**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

**Mudanças no uso e cobertura do solo e resposta hidrológica da bacia
do rio Piracicaba**

Rochane de Oliveira Caram

**Tese apresentada para obtenção do título de Doutor
em Ciências. Área de concentração: Irrigação e
Drenagem**

**Piracicaba
2010**

Rochane de Oliveira Caram
Engenheira Agrícola e Ambiental

**Mudanças no uso e cobertura do solo e resposta hidrológica da bacia do rio
Piracicaba**

Orientador:
Prof. Dr. **CARLOS ALBERTO VETTORAZZI**

**Tese apresentada para obtenção do título de Doutor
em Ciências. Área de concentração: Irrigação e
Drenagem**

**Piracicaba
2010**

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - ESALQ/USP**

Caram, Rochane de Oliveira

Mudanças no uso e cobertura do solo e resposta hidrológica da bacia do rio Piracicaba /
Rochane de Oliveira Caram. - - Piracicaba, 2010.
140 p. : il.

Tese (Doutorado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2010.

1. Bacia hidrográfica - Rio Piracicaba 2. Cobertura do solo 3. Hidrologia - Simulação -
Modelos 4. Impactos ambientais 5. Uso do solo I. Título

CDD 551.483
C259m

"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor"

À minha família...

Aos meus queridos Pais, José Barbosa Caram e Heliomar de Oliveira Azevedo, por contribuir na formação dos meus princípios e valores, e por me apoiar em todos os momentos de minha vida;

Aos meus irmãos: Miguel Ângelo de Oliveira Caram e Haegler de Oliveira Caram pela amizade e por estar sempre presente na minha vida; ao meu sobrinho e afilhado Isac Rigotti Caram e a minha cunhada Ivone Rigotti pelo carinho e atenção;

DEDICO.

“A natureza é o único livro que oferece um conteúdo valioso em todas as suas folhas.”

(Goethe)

AGRADECIMENTOS

A Deus, por estar presente em todos os momentos da minha vida;

Ao Professor, orientador, Carlos Alberto Vettorazzi, por seus ensinamentos e pela sua confiança na realização deste trabalho, pela amizade e carinho;

Ao Professor, Benedito Cláudio da Silva (UNIFEI), por me receber em Itajubá, pelos seus ensinamentos e dedicação incondicional na realização desta tese;

À Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ), Universidade de São Paulo (USP), através do Departamento de Engenharia de Biosistemas e do Programa de Irrigação e Drenagem, por ter me acolhido e pelo suporte concedido para a realização desta tese;

Ao Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH), Instituto Agrônomo de Campinas (IAC), Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE), Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP), Agência Nacional de Águas (ANA), Projeto Piracena (CENA), Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), Instituto de Pesquisas Espaciais (INPE), Centro de Análise e Planejamento Ambiental (CEAPLA) da UNESP/Rio Claro, pelo suporte e por me fornecerem os dados referentes à bacia do rio Piracicaba;

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ), pelo auxílio financeiro;

Ao Professor Javier Tomasella (INPE), e aos colegas Daniel Andre Rodriguez (INPE) e Henrique Rennó (INPE), por ter me ajudado na coleta de dados climáticos;

A amiga Angélica Durigon, pela ajuda indispensável num momento crucial para realização da tese, pela amizade e paciência;

Aos amigos Adriana Ferreira Silva e Flávio Cardoso, pelo incentivo de vir para Piracicaba, por me receber com tanto carinho, e por estar presente em todos os momentos da minha vida durante o doutorado;

A amiga Ana Carolina Nascimento e seus familiares, pelo carinho e por me acolher tantas vezes em sua casa;

Aos Professores, Décio Eugênio Cruciani, Marcos Vinícius Folegatti, Tarlei Arriel Bortrel, Iran José Oliveira da Silva, Sérgio Nascimento Duarte, Rubens Angulo Filho, Peterson Ricardo Fiorio, José Paulo Molin, José Antônio Frizzzone, pelas suas contribuições na minha formação acadêmica;

Aos funcionários do departamento de Engenharia de Biossistemas da ESALQ, Lúcia Monteiro, Davilmar Colevatti, Vanda Macedo, Hamilton Orsini, Gilmar Grigolon, Áureo Santana, Jesuíno Ferrari, pela imensa dedicação e por estarem sempre dispostos a ajudar;

Aos colegas de sala do setor de Topografia e Geoprocessamento, Priscylla Ferraz, Marcelo Peske, Rafael Mingoti, Pedro Giongo, Carlos Padovani, Viviane Vidal, Juliano, pelo suporte na realização desta tese, pela amizade e pelos momentos de descontração que tivemos;

Aos colegas do curso de pós-graduação em Irrigação e Drenagem, em especial Kelly, Pablo, Cícero, Antônio, Tales, Lucas (batatais), Pedro Rónbinson, pelo agradável convívio;

Aos amigos, Daniela Sampaio, Douglas Frabetti, Lilian Oliveira (lili), Lúcia Pittol, Lilian Pittol (liloka), Eduardo Gusson (dodô), Fabiana Rodrigues, Vanessa Duarte, Priscila Casari, Maria Andrade, Elane, Ligia Marinho, Vanessa Vieira, e Mariana Belato pela amizade e carinho, e por estarem presentes em todos os momentos que precisei;

Enfim, a todos aqueles que, de alguma forma colaboraram para realização deste trabalho.

SUMÁRIO

RESUMO.....	11
ABSTRACT	13
LISTA DE FIGURAS	15
LISTA DE TABELAS	19
1 INTRODUÇÃO	21
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	25
2.1 Bacia hidrográfica.....	25
2.1.1 Descrições dos processos hidrológicos.....	27
2.2 Mudanças do uso e cobertura do solo	29
2.3 Uso do geoprocessamento na avaliação do uso da terra	35
2.4 Modelos hidrológicos.....	36
2.5 Parâmetros do modelo que interferem na análise de mudanças do uso e cobertura do solo.....	40
2.5.1 Índice de Área Foliar (IAF)	40
2.5.2 Albedo	42
2.5.3 Resistência aerodinâmica	44
2.5.4 Resistência superficial.....	44
2.5.5 Capacidade de armazenamento de água no solo.....	45
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	49
3.1 Descrição da área de estudo.....	49
3.2 Dados hidrológicos e meteorológicos.....	55
3.2.1 Dados do Sistema Cantareira	59
3.3 Modelo Numérico do Terreno da bacia do rio Piracicaba.....	61
3.4 Mapa pedológico da bacia do rio Piracicaba.....	62
3.5 Mapas de Uso e Cobertura do Solo da bacia do rio Piracicaba	65
3.6 Ajuste do modelo hidrológico a bacia do rio Piracicaba	68
3.6.1 Geração da rede de drenagem	68
3.6.2 Blocos de tipo e uso do solo.....	70
3.6.3 Calibração manual dos parâmetros do modelo	74

3.6.4 Calibração multi-objetivo.....	76
3.6.5 Simulações do modelo hidrológico na bacia do rio Piracicaba	77
3.7 Simulações de cenários alternativos na bacia do rio Piracicaba	78
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	79
4.1 Ajustes e simulações do modelo hidrológico à bacia do rio Piracicaba	79
4.1.1 Calibração dos parâmetros e simulação do modelo hidrológico	79
4.1.2 Verificação da calibração do modelo hidrológico	87
4.1.3 Análise visual de hidrogramas no período de 1973 a 1997	90
4.1.4 Influência do Sistema Cantareira	94
4.1.5 Análises de sensibilidade dos parâmetros.....	97
4.1.6 Calibração multi-objetivo.....	104
4.2 Análises das mudanças de uso e cobertura do solo na bacia do rio Piracicaba....	110
4.2.1 Mudanças de uso do solo na bacia do rio Piracicaba.....	110
4.2.2 Avaliação preliminar na bacia do rio Piracicaba considerando as principais mudanças de uso e cobertura do solo	112
4.3 Cenários alternativos de mudanças de uso do solo	114
5 CONCLUSÕES.....	119
REFERÊNCIAS	121
APÊNDICES	131

RESUMO

Mudanças no uso e cobertura do solo e resposta hidrológica da bacia do rio Piracicaba

Este estudo objetivou avaliar o efeito das mudanças no uso e cobertura do solo nos últimos 37 anos (1972 a 2008) na resposta hidrológica da bacia do rio Piracicaba, SP. As principais mudanças de uso e cobertura do solo na bacia neste período foram aumento da área urbana, redução da área de pastagem e aumento do plantio de cana-de-açúcar. Além disso, a bacia conta com uma peculiaridade, que é a presença do Sistema Cantareira, que desvia água à região metropolitana de São Paulo (RMSP), desde 1974. Foi utilizado o Modelo Hidrológico de Grandes Bacias (MGB), que tem a vantagem de avaliar de forma distribuída a variação da cobertura, do tipo e uso do solo, além da própria propagação no escoamento. O modelo foi ajustado à bacia do rio Piracicaba (área de 12.245 km²) para simulação de vazões diárias. Para o processo de ajuste do modelo foram utilizados dados diários de 1972 a 2008, de 12 postos fluviométricos, 61 pluviométricos e 20 meteorológicos, modelo numérico do terreno, mapas de solos e uso e cobertura do solo (para os anos: 1978, 1983, 1985, 1997 e 2003), e parâmetros que são importantes para diferenciar tipos de solo e usos e coberturas do solo. O processo de simulação das vazões foi realizado em duas etapas: calibração dos parâmetros (entre 1972 a 1990) e verificação (1991 a 2008). Para avaliação da qualidade de ajuste foi considerada a análise visual dos hidrogramas (vazões observadas e calculadas) e os valores das funções objetivo (R², Rlog e ΔV). Foi realizada uma análise de sensibilidade de cada parâmetro, a fim de verificar a influência de cada um. Os resultados mostram um bom ajuste entre as vazões diárias observadas e calculadas pelo modelo. Os melhores resultados das funções objetivo foram obtidos para as sub-bacias de maior área de drenagem. O Sistema Cantareira exerce forte influência na simulação das vazões diárias. As análises de sensibilidade dos parâmetros revelam que os resultados da simulação do modelo são extremamente sensíveis às variações dos parâmetros: capacidade de armazenamento de água no solo (Wm); parâmetro de forma da relação entre o armazenamento e saturação (b); parâmetros de drenagem subterrânea (K_{BAS}) e sub-superficial (K_{INT}); albedo e resistência superficial (r_s). Cenários alternativos em relação às mudanças no uso e cobertura do solo foram testados e comparados a simulação do cenário atual da bacia do rio Piracicaba no período entre 1972 e 2008. Comparando o cenário atual ao cenário em que não ocorreu nenhuma alteração na bacia a partir de 1972, verificou-se uma redução das vazões: máxima de 2,5 m³/s; mínima de 2,1 m³/s; e média de 1,9 m³/s. Outros cenários alternativos foram testados e comparados ao cenário atual e foi verificado um aumento da vazão média de 17,2 m³/s para cenário de 100% agricultura; e maior redução da vazão média de 3,9 m³/s para o cenário de conversão da agricultura para pastagem.

Palavras-chave: Mudanças de uso e cobertura do solo; Bacia do rio Piracicaba; Simulação hidrológica

ABSTRACT

Land use/land cover changes and hydrological response in the Piracicaba river basin

This study aimed at to evaluate the effect of changes in land use and land cover over the last 37 years (1972 to 2008) on the hydrological response in the Piracicaba river basin, SP. The main changes in the land use and land cover in the basin over that period were the increase in the urban area, decrease in the pasture area, and increase in the sugarcane plantations. Moreover, the basin has a peculiarity, which is the presence of the Cantareira System, which diverts water to the metropolitan region of São Paulo (RSMP), since 1974. We used a hydrological model of Great Basin (MGB), which has the advantage of evaluating in the distributed form, the variation of the land use/land cover, besides the flow propagation. The model was adjusted to the Piracicaba river basin (12,245 Km² in area) to simulate daily streamflow. Daily data, from 1972 to 2008, were used for the process of model fitting, from 12 streamflow stations, 61 rainfall and 20 meteorological, digital terrain model, maps of soils and land use and land cover (for the years 1978, 1983, 1985, 1997 and 2003), and parameters that are important to differentiate soil types and uses and land cover. The process of simulation of the streamflow was carried out in two stages: calibration of parameters (from 1972 to 1990) and verification (1991 to 2008). To assess the quality of fitting it was considered the visual analysis of the hydrographs (observed and calculated streamflows) and the values of objective functions (R², Rlog and ΔV). We performed a sensitivity analysis of each parameter, in order to verify the influence of each one. The results showed a good fitting between the daily observed and calculated streamflows. The best results of the objective functions were obtained for the sub-basins of larger drainage area. The Cantareira System strongly influences the simulation of daily streamflow. Sensitivity analysis of parameters revealed that the simulation results of the model are extremely sensitive to variations of the parameters: soil water storage capacity (Wm), form parameter of the relationship between storage and saturation (b), parameters of drainage underground (K_{BAS}) and subsurface (K_{INT}), albedo and surface resistance (r_s). Alternative scenarios for changes in the land use and land cover were tested and compared the simulation of the scenario actual of Piracicaba river basin in the period between 1972 and 2008. Comparing the scenario with no changes in the basin since 1972 to the actual scenario, a reduction in streamflow was detected: maximum of 2,5 m³/s, minimum of 2,1 m³/s, and an average of 1,9 m³/s. Other scenarios were tested and compared to the actual scenario, and it was detected an increase of the mean streamflow of 17,2 m³/s for scenario 100% of agriculture, and a decrease of the mean streamflow of 3,9 m³/s for the scenario of conversion from agriculture into pasture.

Keywords: Land use/land cover changes; Piracicaba river basin; Hydrological simulation

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Microbacias experimentais com cobertura florestal e pastagem: a remoção da floresta altera os componentes do balanço hídrico, causando desequilíbrios que resultam no aumento da vazão.....	34
Figura 2 - Capacidade de armazenamento de água no solo, em mm, para o primeiro metro do solo para o Brasil.....	47
Figura 3 - Localização geográfica da bacia do rio Piracicaba no estado de São Paulo .	49
Figura 4 - Produção da cana-de-açúcar no estado de São Paulo.....	51
Figura 5 - Evolução da área plantada com as principais culturas na região da bacia do rio Piracicaba	52
Figura 6 - Localização dos postos pluviométricos, meteorológicos e fluviométricos na bacia do rio Piracicaba.....	56
Figura 7 – Mapas interpolados gerados no OpenGRADS para o mês de janeiro de 1972: temperatura (a); umidade relativa (b); velocidade do vento (c); radiação solar (d) e pressão atmosférica (e).....	58
Figura 8 - Fluxograma simplificado do Sistema Cantareira.....	60
Figura 9 - Localização das represas e túneis do Sistema Cantareira na bacia do rio Piracicaba, e os pontos de vazão retirada e libera a jusante de cada represa	60
Figura 10 - Modelo Numérico do Terreno (MNT) da bacia do rio Piracicaba	61
Figura 11 - Classificação dos grupos de solos na bacia do rio Piracicaba.....	64
Figura 12 - Mapa de uso e cobertura do solo na bacia do rio Piracicaba para o ano de 1978.....	66
Figura 13 - Mapa de uso e cobertura do solo na bacia do rio Piracicaba para o ano de 1985.....	66
Figura 14 - Mapa de uso e cobertura do solo na bacia do rio Piracicaba para o ano de 1993.....	67
Figura 15 - Mapa de uso e cobertura do solo na bacia do rio Piracicaba para o ano de 1997.....	67
Figura 16 - Mapa de uso e cobertura do solo na bacia do rio Piracicaba para o ano de 2003.....	68

Figura 17 - Discretização e rede drenagem obtida para a bacia do rio Piracicaba e sub-bacias selecionadas para ajuste do modelo hidrológico	69
Figura 18 - Blocos do modelo para a bacia do rio Piracicaba, resultantes da combinação das classes de tipos e uso do solo de 1978 (a); 1985 (b); 1993 (c); 1997 (d); e 2003 (e).....	71
Figura 19 – Localização das represas do Sistema Cantareira na área da bacia delimitada pelo modelo hidrológico	77
Figura 20 – Hidrogramas de vazões diárias (observado e calculado) do rio Piracicaba no posto fluviométrico de Artemis, de 1973 a 1990.....	82
Figura 21 – Hidrogramas de vazões diárias (observado e calculado) do rio Piracicaba no posto fluviométrico de Artemis, de 1990	83
Figura 22 – Curvas de permanência de vazões diárias (observada e calculada) do rio Piracicaba no posto fluviométrico de Artemis, no período de 1973 a 1990...	83
Figura 23 – Hidrogramas de vazões diárias (observado e calculado) do rio Camanducaia no posto fluviométrico de Amparo, de 1973 a 1978	84
Figura 24 – Hidrogramas de vazões diárias (observado e calculado) do rio Camanducaia no posto fluviométrico de Amparo, de 1987	85
Figura 25 – Hidrogramas de vazões diárias (observado e calculado) do rio Atibaia no posto fluviométrico de Atibaia, de 1973 a 1990.....	86
Figura 26 – Hidrogramas de vazões diárias (observado e calculado) do rio Atibaia no posto fluviométrico de Atibaia, de 1990.....	86
Figura 27 – Hidrogramas de vazões diárias (observado e calculado) do rio Piracicaba no posto fluviométrico de Artemis, de 1991 a 1999.....	88
Figura 28 – Hidrogramas de vazões diárias (observado e calculado) do rio Piracicaba no posto fluviométrico de Artemis, de 2000 a 2008.....	89
Figura 29 – Hidrogramas de vazões diárias (observado e calculado) do rio Jaguari no posto fluviométrico de Buenópolis, de 1991 a 1998	89
Figura 30 – Hidrogramas de vazões diárias (observado e calculado) do posto fluviométrico de Atibaia, de 2001 a 2004	90
Figura 31 – Curvas de permanência de vazões diárias (observada e calculada) do rio Piracicaba no posto fluviométrico de Artemis, de 1991 a 2008	90

Figura 32- Hidrogramas de vazões diárias (observado e calculado) do posto fluviométrico de Buenópolis, do rio Jaguari, de 1973 a 1995.....	92
Figura 33 - Hidrogramas de vazões diárias (observado e calculado) do posto fluviométrico de Bairro da Ponte, do rio Atibaia, de 1973 a 1995	92
Figura 34 - Hidrogramas de vazões diárias (observado e calculado) do posto fluviométrico de Piracicaba, do rio Piracicaba, de 1973 a 1995.....	93
Figura 35 - Hidrogramas de vazões diárias (observado e calculado) do posto fluviométrico de Piracicaba, do rio Piracicaba, de 1973 a 1995.....	94
Figura 36 – Hidrogramas de vazões diárias (observado e calculado) do rio Jaguari no posto fluviométrico de Buenópolis, de 1981 a 1990: Simulação sem o Sistema Cantareira (a) e Calibração (b)	96
Figura 37 – Hidrogramas de vazões diárias (observado e calculado) do rio Atibaia no posto fluviométrico de Atibaia, de 1976 a 1990: Simulação sem o Sistema Cantareira; e Calibração (b).....	97
Figura 38 - Sensibilidade dos coeficientes de ajuste (R^2 e R_{log}) às variações do armazenamento máximo de água no solo W_m (a); e do erro no volume (ΔV) (b)	100
Figura 39 - Sensibilidade dos coeficientes de ajuste (R^2 e R_{log}) às variações do parâmetro b (a); e do erro no volume (ΔV) (b).....	101
Figura 40 - Sensibilidade dos coeficientes de ajuste (R^2 e R_{log}) às variações do parâmetro K_{BAS} (a); e do erro no volume (ΔV) (b).....	103
Figura 41 - Sensibilidade dos coeficientes de ajuste (R^2 e R_{log}) às variações do parâmetro K_{INT} (a); e do erro no volume (ΔV) (b).....	104
Figura 42 - Sensibilidade dos coeficientes de ajuste (R^2 e R_{log}) às variações do parâmetro albedo (a); e do erro no volume (ΔV) (b)	105
Figura 43 - Sensibilidade dos coeficientes de ajuste (R^2 e R_{log}) às variações do parâmetro r_s (a); e do erro no volume (ΔV) (b)	106
Figura 44 – Hidrogramas de vazões diárias (observado e calculado) do posto fluviométrico de Carioba, de 1973 a 1978	108
Figura 45 – Hidrogramas de vazões diárias (observado e calculado) do posto fluviométrico de Artemis, de 1986 a 1990.....	109

Figura 46 - Hidrogramas de vazões diárias (observado e calculado) do posto fluviométrico de Piracicaba, de 1991 a 1994.....	109
Figura 47 – Evolução da área ocupada pelas principais classes de uso e ocupação do solo na bacia do rio Piracicaba, de 1978 a 2003.....	111

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Classificação sobre a mudança e uso do solo	30
Tabela 2.2 - Relação entre áreas de aplicação e modelos hidrológicos	38
Tabela 2.3 - Valores médios diário de albedo para classes de cobertura do solo.....	43
Tabela 2.4 - Valores de albedo médio mensal para floresta amazônica e áreas de pastagem na Amazônia.....	43
Tabela 3.1 - Principais grupos de solos na bacia do rio Piracicaba, de acordo com as características que influenciam o comportamento hidrológico	62
Tabela 3.2 - Área ocupada pelos principais grupos de solos na bacia do rio Piracicaba	64
Tabela 3.3 - Porcentagem de área ocupada pelas principais classes de uso e ocupação do solo na bacia do rio Piracicaba.....	65
Tabela 3.4 - Sub-bacias consideradas para a calibração e verificação do modelo hidrológico, na bacia do rio Piracicaba.....	69
Tabela 3.5 - Blocos de tipos de solos e usos do solo da bacia do Rio Piracicaba, considerados na modelagem hidrológica	70
Tabela 3.6 – Blocos de tipos de solo e usos do solo da bacia do rio Piracicaba, considerados na modelagem hidrológica	73
Tabela 3.7 – Faixa de valores em que se permitiu a variação dos parâmetros durante a calibração automática	76
Tabela 3.8 – Cenários alternativos simulados.....	78
Tabela 4.1 - Valores das funções objetivo para o período de calibração (1973 a 1990)	81
Tabela 4.2 - Valores das funções objetivo no período de verificação (1991 a 2008)	87
Tabela 4.3 - Valores das funções objetivo para o período 1973 a 1990	95
Tabela 4.4 - Sensibilidade das funções objetivo aos parâmetros do modelo.....	99
Tabela 4.5 - Valores das funções objetivo da calibração automática (no período 1973 a 1990) e da verificação da calibração (no período 1991 a 2008).....	107
Tabela 4.6 – Diferenças das áreas de uso do solo (%), entre 1978 e 2003, para cada sub-bacia da bacia do rio Piracicaba.....	111
Tabela 4.7 – Cenários simulados.....	113

Tabela 4.8 – Vazão média, lâmina escoada e diferença de escoamento anual em relação à situação hipotética, em que a bacia não sofre nenhuma mudança de uso do solo	113
Tabela 4.9 – Vazão máxima, mínima e média, lâmina escoada e diferença de escoamento anual em relação à situação atual, obtida para o período entre 1972 a 2008 para a sub-bacia de Artemis, que abrange uma área de 10.909 Km ²	114

1 INTRODUÇÃO

A quantidade de água disponível em um rio é uma função direta do balanço hídrico ocorrido na respectiva bacia. A definição dos elementos que compõem o ciclo hidrológico e suas variações no tempo e no espaço é de fundamental importância, tanto para caracterizar e entender os aspectos básicos de funcionamento de uma bacia hidrográfica, quanto para gerenciar seus recursos hídricos. Além disso, o clima é um dos principais reguladores dos ciclos biogeoquímicos dos elementos no solo, na água e no ar.

Os impactos de alterações na cobertura e no uso do solo rural influenciam no comportamento hidrológico das bacias hidrográficas, pois modificações naturais ou artificiais na cobertura vegetal têm influência direta no escoamento, na produção de sedimentos e na qualidade da água (TUCCI; CLARKE, 1997).

Para dar suporte ao manejo de recursos hídricos e prever os impactos hidrológicos produzidos pelas mudanças de uso e cobertura do solo, modelos hidrológicos para bacias hidrográficas são importantes instrumentos.

A “simulação hidrológica” em bacias hidrográficas tem sido, contudo, extensamente utilizada, pois apresenta grande utilidade na estimativa de disponibilidade dos recursos hídricos, na previsão de vazão de curto e médio prazo, na análise da variabilidade hidrológica, nos impactos de mudanças do uso do solo, entre outros. Previsões podem, por exemplo, auxiliar agricultores a se preparar para o próximo de ciclo de irrigações e auxiliar na implantação de sistemas de alerta contra cheias.

Há ainda um grande esforço científico para esclarecer o papel da vegetação no ciclo hidrológico e para fazer uma previsão das consequências de mudanças do uso e cobertura do solo. Muitos estudos de simulação hidrológica mostram que existe uma relação entre aumento do escoamento e mudanças no uso do solo, como por exemplo a redução de chuva em função do desmatamento, a capacidade de infiltração do solo sob florestas é maior do que sob pastagens ou cultivos agrícolas devido à rugosidade das superfícies, entre outros.

Os modelos matemáticos nem sempre são confiáveis para estimar os efeitos das mudanças do clima e do uso do solo, devido à incerteza dos parâmetros das variáveis.

Sempre que possível, devem-se comparar as previsões obtidas com os dados observados em campo.

Um dos grandes desafios da hidrologia tem sido o melhor entendimento da escala em que os processos hidrológicos se desenvolvem. Modelos de Circulação Atmosférica Global (GCM) têm sido aplicados para análise de processos de grande escala, tratando-se de importantes instrumentos para avaliação de mudanças climáticas, porém inadequadas para a descrição dos processos de transporte lateral ou propagação de vazões (COLLISCHONN; TUCCI, 2001). Segundo Fowler et al. (2007) existe uma defasagem clara entre a modelagem climática e hidrológica, em termos de escalas espacial e temporal, e entre a precisão GCM e a importância hidrológica das variáveis.

Modelos hidrológicos adequados para as pequenas bacias não são, em geral, adequados para a simulação de grandes bacias. Para tanto, a busca de modelos hidrológicos de grande escala vem sendo acompanhada pela busca de dados adequados para esta escala, e que estejam disponíveis em grandes extensões geográficas. Neste sentido, as técnicas de Sensoriamento Remoto, aliadas aos Sistemas de Informação Geográfica, são amplamente utilizadas para obter informações de parâmetros de superfície, cujo nível de detalhamento é determinado pelas resoluções temporal e espacial dos sensores multiespectrais utilizados, permitindo realizar estudos em áreas de grandes extensões, sendo uma solução viável, identificar as características dos agentes modificadores do espaço, reconhecer e mapear, além de estimar a extensão e a intensidade das alterações provocadas pelo homem, contribuindo significativamente para o monitoramento presente e futuro dos fenômenos analisados.

Diante das considerações apresentadas, o objetivo principal desta pesquisa foi analisar as consequências nas mudanças do uso do solo dos últimos 37 anos, no comportamento hidrológico da bacia hidrográfica do rio Piracicaba, utilizando um modelo hidrológico distribuído, desenvolvido para simulação de grandes bacias. Os objetivos específicos foram:

- Ajustar o modelo hidrológico físico distribuído para simulação de vazões na bacia do rio Piracicaba;

- Analisar as mudanças no uso do solo, dos últimos 37 anos, na bacia do rio Piracicaba;
- Avaliar os impactos das mudanças no uso do solo no comportamento hidrológico na bacia do rio Piracicaba;
- Realizar simulações de vazão na bacia do rio Piracicaba, utilizando cenários alternativos, quanto às mudanças do uso do solo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Bacia hidrográfica

A Política Nacional de Recursos Hídricos, instituída pela Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, incorpora princípios e normas para a gestão de recursos hídricos adotando a definição de bacias hidrográficas como unidade de estudo e gestão. A compreensão do conceito de bacia hidrográfica e de suas subdivisões é de grande importância para gestores e pesquisadores.

Diferentes conceitos de bacia hidrográfica podem ser encontrados na literatura, porém, percebe-se grande semelhança entre diversos autores. É definida como uma área de captação natural da água da precipitação que faz convergir os escoamentos para um único ponto de saída, seu exutório (TUCCI, 2007), ou seja, é um conjunto de terras drenadas por um rio principal e seus afluentes, formada nas regiões mais altas do relevo por divisores de água (BARELLA et al., 2001).

A idéia de bacia hidrográfica está associada à noção da existência de nascentes, divisores de águas e características dos cursos de água, principais e secundários, denominados afluentes e subafluentes. Uma bacia hidrográfica evidencia a hierarquização dos rios, ou seja, a organização natural por ordem de menor volume para os mais caudalosos, que vai das partes mais altas para as mais baixas. As bacias podem ser classificadas de acordo com sua importância, como principais (as que abrigam os rios de maior porte), secundárias e terciárias; e segundo sua localização, como litorâneas ou interiores.

Definições que envolvem as subdivisões da bacia hidrográfica (sub-bacia e microbacia) apresentam abordagens diferentes quanto aos fatores físicos e ecológicos para alguns autores.

As sub-bacias são áreas de drenagem dos tributários do curso d'água principal e para definir sua área, autores utilizam diferentes unidades de medida, como por exemplo: áreas entre 100 e 700 km² (FAUSTINO, 1996); áreas entre 20.000 e 30.000 ha (ROCHA, 1997, apud MARTINS et al., 2005); ou ainda, bacias podem ser desmembradas em um número qualquer de sub-bacias, dependendo do ponto de saída

considerado ao longo do seu eixo-tronco ou canal coletor (SANTANA, 2003). Cada bacia hidrográfica interliga-se com outra de ordem hierárquica superior, constituindo, em relação à última, uma sub-bacia.

Calijuri e Bubel (2006) definem microbacias hidrográficas como áreas formadas por canais de 1ª e 2ª ordem e, em alguns casos, de 3ª ordem, devendo ser definidas como base na dinâmica dos processos hidrológicos, geomorfológicos e biológicos. As microbacias são áreas frágeis e frequentemente ameaçadas por perturbações, nas quais as escalas espacial, temporal e observacional são fundamentais. Para Faustino (1996), a microbacia possui toda sua área com drenagem direta ao curso principal de uma sub-bacia, várias microbacias formam uma sub-bacia, sendo a área de uma microbacia inferior a 100 km².

A ocupação das bacias pelo homem vem sendo realizada com pouco planejamento, sem maior preocupação com a preservação do meio ambiente; contudo, a complexidade dos sistemas hídricos cresceu, devido à diminuição da disponibilidade dos recursos hídricos e deterioração da qualidade das águas (TUCCI, 2007).

Qualquer tipo de uso de solo na bacia interfere no ciclo hidrológico, não importando o grau do tipo de uso. O transporte de sedimentos é controlado por fatores como a quantidade e distribuição de precipitações, estrutura geológica, condições topográficas e cobertura vegetal. A atividade humana aumenta ou diminui a quantidade de água escoada superficialmente, influenciando o regime fluvial e o transporte de sedimentos (CHRISTOFOLETTI, 1981).

O estudo das características físicas de uma bacia hidrográfica pode fornecer dados importantes para a prevenção e avaliação de riscos ambientais em determinadas porções do território, sendo a rede de drenagem um importante indicador de alterações ocorridas na composição da paisagem de bacias hidrográficas, que ocorrem devido a processos naturais ou atividades antrópicas. Tais alterações, como na qualidade da água, ou na estruturação e na forma das redes, e ainda a perda ou o surgimento de novos canais, que podem ocasionar mudanças no escoamento superficial das águas. Segundo Villela e Mattos (1975), através de relações e comparações entre as características físicas de uma bacia e dados hidrológicos conhecidos, pode-se determinar indiretamente os valores hidrológicos em locais nos quais faltem dados.

Os parâmetros quantitativos de uma rede (bacia) de drenagem superficial são de grande importância agrônoma para o estudo e classificação de solos. Diferentes tipos de solo possuem elementos de identificação de suas classes, como o material de origem, a pedoforma (topografia), o padrão de drenagem, sendo o relevo considerado um importante critério na fotopedologia.

No Brasil destaca-se um grande desenvolvimento de estudos fotointerpretativos das bacias hidrográficas envolvendo pedologia e agricultura, avaliação do uso e ocupação do solo, muito utilizados em trabalhos de monitoramento ambiental (PISSARRA et al., 2005). Dentre os pesquisadores que realizaram análise quantitativa em sistema de drenagem, podemos citar Horton (1945), Strahler (1957), França (1968), Christofolletti (1978), Angulo Filho (1981), etc., e estes determinaram diferenças essenciais entre distintas paisagens.

2.1.1 Descrições dos processos hidrológicos

O comportamento hidrológico de uma bacia hidrográfica é função de suas características geomorfológicas (forma, relevo, área, geologia, rede de drenagem, solo etc.) e do tipo da cobertura vegetal existente (LIMA, 1976). Além disso, também é afetado por ações antrópicas, uma vez que, ao intervir no meio natural, o homem acaba interferindo nos processos do ciclo hidrológico (TONELLO, 2005).

Os processos hidrológicos na bacia hidrográfica possuem duas direções predominantes de fluxo: vertical e o longitudinal. O vertical é representado pelos processos de precipitação, evapotranspiração, umidade e fluxo no solo, enquanto que o longitudinal, pelo escoamento na direção dos gradientes da superfície (escoamento superficial e rios) e do subsolo (escoamento subterrâneo) (TUCCI; CLARKE, 1997).

A vegetação tem papel fundamental no balanço de energia e no fluxo de volumes de água, pois a precipitação é retida por ela; quanto maior for a superfície de cobertura, maior a área de retenção da água durante a precipitação. O volume retido é perdido por evaporação, retornando à atmosfera. Este processo funciona como um reservatório que armazena uma parcela da precipitação para consumo e a tendência é de que a

interceptação reduza a variação da vazão ao longo do ano, retarde e reduza o pico das cheias (TUCCI, 2007). Além disso, numa superfície vegetada ocorrem simultaneamente os processos de evaporação e de transpiração, e a ocorrência simultânea de ambos define a evapotranspiração, que é controlada pela disponibilidade de energia, pela demanda atmosférica e pelo suprimento de água às plantas (PEREIRA et al., 1997).

A precipitação é toda água proveniente do meio atmosférico que atinge a superfície terrestre, em suas diferentes formas, como, neblina, chuva, granizo, saraiva, orvalho, geada e neve. Entretanto, a chuva é o tipo de precipitação mais importante para a hidrologia, devido a sua capacidade de produzir escoamento. Da parcela de precipitação que atinge o solo, parte pode transformar-se em escoamento superficial, parte é armazenada em depressões, e parte infiltrar-se no solo. Tudo vai depender de condições variáveis, como a quantidade de umidade já existente, das características do solo e da sua cobertura. Parte da água que infiltra alimenta os reservatórios subterrâneos que irão escoar e atingir rios e oceanos (TUCCI, 2007).

O conhecimento do processo de infiltração é de fundamental importância para o manejo e conservação do solo e da água, por ser determinante da ocorrência do escoamento superficial, responsável por processos indesejáveis, como a erosão e as inundações (BRANDÃO et al., 2006). Segundo Rawls et al. (1996), a infiltração da água no solo é um processo que depende de diversos fatores, em menor ou maior grau, os quais foram divididos em quatro categorias: fatores relacionados ao solo; fatores relacionados à superfície; preparo e manejo do solo; e outros. Um solo argiloso, por exemplo, pode ter uma alta capacidade de infiltração quando estiver seco, no entanto, após receber umidade pode se tornar quase que impermeável (TUCCI, 2007).

Contudo, todos os fatores que influenciam a taxa de infiltração da água no solo interferem no escoamento superficial, além de inúmeros outros fatores como: agroclimáticos (intensidade e duração da precipitação, cobertura e os tipos de uso do solo, evapotranspiração); fisiográficos (área, declividade, e forma da bacia) (PRUSKI et al., 2003). O escoamento superficial é um dos primeiros fatores a serem alterados quando a cobertura vegetal da bacia é modificada e, conseqüentemente, a produção de sedimentos, que se constitui um grande problema no Brasil, onde são perdidos, a cada ano, 600 milhões de toneladas de solo agrícola (BAHIA et al., 1992).

O escoamento superficial pode ser gerado em toda superfície (para capacidade de infiltração menor que a precipitação) e o escoamento sub-superficial escoar até o rio. No entanto, existem áreas onde praticamente não ocorre escoamento superficial (quando toda a precipitação se infiltra), tendo um significativo escoamento sub-superficial que é transportado através de macroporos, que pode aparecer na superfície através de fontes, produzindo escoamento superficial em conjunto com a precipitação local (TUCCI, 2002).

Para se conhecer o comportamento hidrológico de uma bacia hidrográfica sob sua condição original (vegetação nativa) ou após intervenção antrópica, deve ser realizada uma análise do processo precipitação-vazão. Esta é feita pelo estabelecimento de relações quantitativas entre os processos hidrológicos no ciclo hidrológico. Ela deve ser realizada através de monitoramento e modelagem numérica, simultaneamente.

As séries temporais de vazão são o resultado da integração dos componentes do ciclo hidrológico e, conseqüentemente, das influências naturais e antrópicas numa determinada região, tendo fundamental importância como subsídio para as tomadas de decisão em relação à racionalização do uso da água e à conservação desse recurso (MORTATTI et al., 2004).

O planejamento da ocupação de uma bacia hidrográfica é de extrema importância diante dos usos crescentes da água, e que tende a ocupar espaços com riscos de inundação, além de danificar o seu meio. Tal planejamento requer uma visão ampla sobre as necessidades da população, os recursos terrestres e aquáticos disponíveis e o conhecimento sobre o comportamento dos processos naturais na bacia, para racionalmente compatibilizar necessidades crescentes com recursos limitados.

2.2 Mudanças do uso e cobertura do solo

O estudo do uso e cobertura do solo consiste em buscar conhecimento de toda a sua utilização por parte do homem ou pela caracterização dos tipos e categorias de vegetação natural que reveste o solo. Tucci e Clarke (1998) identificaram grandes

variações de vazão em várias sub-bacias do rio Prata, devido a dois componentes básicos: modificações antrópicas e variabilidade climática.

A alteração da superfície da bacia tem impactos significativos sobre o escoamento, e este impacto normalmente é caracterizado quanto ao efeito que provoca no comportamento das enchentes, nas vazões mínimas e na vazão média (TUCCI, 2005). Na Tabela 2.1 são apresentadas as principais classificações sobre a mudança e uso do solo da bacia.

Tabela 2.1 - Classificação sobre a mudança e uso do solo

Classificação	Tipo	Principais impactos sobre o escoamento
Mudança da superfície	Desmatamento	Aumento da vazão média, aumento ou diminuição da vazão mínima
	Reflorestamento	Redução do escoamento médio, capacidade erosiva
O uso de superfície	Urbanização	Redução da infiltração no solo, aumentando o escoamento superficial, reduzindo o escoamento subterrâneo, redução da evapotranspiração. Aumento das vazões máximas e na produção de sedimentos, e a deterioração da qualidade da água
	Reflorestamento para exploração sistemática	Redução do escoamento médio, impacto da construção de estradas e a capacidade erosiva gerada pela superfície desprotegida após a extração
	Culturas agrícolas de subsistência e permanentes	Intensidade pequena ou intermediária
	Culturas anuais	Intensidade alta, pois prevê a preparação do solo (aragem) antes do período chuvoso. O plantio sem nenhum cuidado tende a aumentar a erosão e o escoamento.
Método de alteração	Manual	Menor impacto, porém dispendioso
	Equipamentos	Compactação do solo, reduzindo a infiltração de água no solo

Fonte: Tucci (2005)

Num cenário em que se anunciam alterações importantes na distribuição e na quantidade da precipitação, o conhecimento da ocupação do solo e das respectivas tendências de evolução deverá se constituir em mais um dos elementos a ponderar sobre as estratégias de resposta e de adaptação, com vista à eficaz gestão dos recursos hídricos no futuro (NUNES, 2006).

Para isso, modelos matemáticos têm sido largamente empregados na predição de cenários futuros, visando a auxiliar no manejo de bacias hidrográficas. A aplicação desses modelos permite o estudo de vários cenários diferentes e de forma rápida, e

ainda oferece um baixo custo de execução comparado ao custo relativo à investigação experimental.

Uma característica importante na utilização de modelos na simulação de cenários alternativos de uso da terra é tratar a paisagem em bacias hidrográficas de forma global, identificando as “áreas sensíveis ambientalmente”, onde são necessárias práticas de controle dos processos erosivos e não somente práticas de proteção dispensada aos cursos d’água por meio da mata ciliar (MACHADO et al., 2003).

A mudança de uso e cobertura do solo é geralmente um processo de escala local, cujos impactos diminuem para grandes escalas. Mudanças climáticas, por outro lado, apresentam impactos em todas as escalas. As escalas de impacto da combinação de cobertura do solo natural e mudanças induzidas pelo homem são pouco conhecidas, e são fortemente dependentes do contexto climático. E ainda, a suposição de que as relações observadas em escalas locais são mantidas maiores tem frequentemente levado a conclusões inadequadas (BLOSCH et al., 2007), uma vez que os diferentes processos são dominantes em diferentes escalas, e a vazão é o resultado de muitos fatores sobrepostos.

Bronstert et al. (2007) evidenciaram que cenários climáticos regionais devem ser somente aplicados para aplicação hidrológica se as variações de escala espaço-temporal dos processos hidrológicos forem representadas pelos cenários. Para estudos de impactos hidrológicos, em escala regional, a informação sobre a temperatura e variabilidade espaço-temporal da precipitação é da mais alta relevância, mas as alterações dos cenários climáticos raramente focam nesta informação especificamente.

Há um consenso geral de que as mudanças do uso do solo afetam a resposta hidrológica em termos de produtividade da água, através de alterações na taxa de evaporação associada aos diferentes tipos de vegetação (ANDRÉASSIAN, 2004; BRUIJNZEEL, 2004).

Como amplamente relatado na literatura, as mudanças na cobertura das florestas em microbacias resulta em mudanças no balanço entre precipitação e evaporação, e afeta a resposta hidrológica da bacia. Em geral, estudos forneceram evidências de que a substituição de florestas por pastagem ou culturas leva a um

aumento na produtividade da água e no volume de fluxo rápido, e nos picos de vazões em eventos extremos.

Embora experimentos de pequenas escala tem mostrado que a remoção da floresta tende a aumentar a vazão, esses resultados não são esclarecedores para bacias de grande escala (TRANCOSO et al., 2007).

Hibbert (1967) avaliou o resultado de 39 bacias experimentais existentes no mundo, e relacionou o uso do solo com os processos hidrológicos, concluindo que: (1) a redução da cobertura florestal aumenta a vazão média; (2) o estabelecimento de cobertura florestal em áreas de vegetação esparsa diminui a vazão média; (3) a resposta da mudança é muito variável e, na maioria das vezes, não é possível prever.

Bosch e Hewlett (1982) analisaram a alteração da vazão média, em bacias experimentais pareadas e isoladas. Os resultados da análise, principalmente das bacias pareadas, foram: (1) foram confirmadas as duas primeiras conclusões de Hibbert, mas os elementos existentes permitem estimar somente a ordem de magnitude das alterações com base no tipo de vegetação e na precipitação; (2) não é possível detectar influência na vazão média quando o desmatamento é menor que 20%; (3) a retirada de cobertura de coníferas ou eucaliptos causa aumento de cerca de 40 mm na vazão anual, enquanto que a retirada da vegetação rasteira produz aumento de 10 a 25 mm na vazão média, para cada 10% de alteração de cobertura. Esses valores são aproximados e podem ser utilizados como indicadores.

Bruijnzeel (1990), citado por Tucci e Clarke (1997), atualizou o estudo de Bosch e Hewlett. As principais conclusões do autor foram: (1) confirmou as conclusões de Bosch e Hewlett de que a retirada de floresta natural resulta em considerável aumento inicial de vazão média (até 800 mm/ano), em função da precipitação; (2) a vazão média, após o crescimento da nova vegetação, pode ficar acima das condições de pré-desmatamento no caso de culturas anuais, vegetação rasteira e plantação de chá e retornar as condições naturais para pinus e reduzir a vazão para eucaliptos.

Collishoonn (2001) apresentou resultados da avaliação do uso do solo para a bacia do rio Taquari, afluente do Jacuí, no Rio Grande do Sul, que é vizinho à cabeceira do rio Uruguai, em que o cenário atual apresentou 9% de aumento de escoamento em função do uso do solo. Transformando a cobertura de floresta em culturas anuais, o

aumento do escoamento é de 14,4%, e para pasto é de 13,2%. Sendo assim, a mudança do uso do solo na região pode explicar, em parte, as tendências das vazões.

De acordo com Tucci e Clark (1997) o aumento do escoamento é ainda maior se o desmatamento for realizado com tratores e no uso posterior do solo for utilizada mecanização, pois aumenta a compactação da camada superficial do solo e diminui a infiltração da água da chuva.

Oliveira (2006) avaliou os impactos do desmatamento da Amazônia no clima local, utilizando um modelo atmosférico (BRAMS) com diferentes cenários de desmatamento prescritos para a região. No cenário mais otimista (Governance ou GOV), medidas governamentais são tomadas no sentido de reduzir o desmatamento, enquanto que num segundo cenário (Business as Usual ou BUS) as taxas de desmatamento seguem os padrões atuais. Pode-se sintetizar das simulações realizadas que as variáveis hidrometeorológicas simuladas indicaram impacto da mudança do uso de solo prevista, em que o cenário BUS causa efeitos mais pronunciados do que o cenário GOV, em virtude das taxas de desmatamento mais elevadas.

Espinoza et al. (2009) analisaram as mudanças de escoamento regional na bacia Amazônica e as possíveis conexões com a precipitação, e concluíram que a mais provável causa das tendências observadas nas vazões das sub-bacias na Amazônia são explicadas pela variabilidade interdecadal natural da chuva. Entretanto, também observaram tendências nos parâmetros hidrológicos para sub-bacias que foram explicadas pelas mudanças de uso e cobertura do solo.

Um estudo realizado por Rodriguez et al. (2010) na bacia do Ji-Paraná, localizada no sudoeste da Amazônia, que possui uma área superior a 30.000 Km², a fim de detectar sinais na resposta hidrológica em função das mudanças de uso e cobertura do solo, mostrou que o impacto das mudanças reduz com a escala da bacia, e em escalas maiores, a variabilidade da chuva controla a maioria das respostas hidrológicas. Além disso, também encontraram tendências significativas nos parâmetros hidrológicos relacionados às mudanças de uso e cobertura do solo.

Resultados de pesquisas feitas em microbacias experimentais em diversas regiões do mundo vêm demonstrando que a remoção da floresta causa profundas alterações no ciclo hidrológico (Figura 1), sendo a principal delas a ampliação da vazão

dos cursos d'água locais, além da redução da evapotranspiração e o aumento do escoamento superficial (TRANCOSO et al., 2007).

Figura 1 - Microbacias experimentais com cobertura florestal e pastagem: a remoção da floresta altera os componentes do balanço hídrico, causando desequilíbrios que resultam no aumento da vazão. Fonte: Trancoso et al. (2007)

Trancoso et al. (2007) realizaram experimentos em microbacias com cobertura florestal e pastagem na Amazônia central, e verificaram: alterações significativas na forma de distribuição da vazão, sendo que no pico da estação seca a vazão é menor; a velocidade e a forma da resposta à precipitação são bastante diferentes na floresta e na pastagem; os picos de vazão máxima são mais acentuados na pastagem, enquanto na floresta a velocidade é menor.

2.3 Uso do geoprocessamento na avaliação do uso da terra

A caracterização e avaliação da dinâmica do uso da terra e dos indicadores da erosão hídrica do solo podem ser conduzidas utilizando-se informações obtidas com técnicas de sensoriamento remoto, tendo como ênfase as fotografias aéreas e imagens orbitais de alta resolução espacial (PINTO; GARCIA, 2005).

As primeiras classificações de uso e cobertura do solo baseavam-se em trabalhos de campo. Posteriormente, a partir de década de 50, um grande número de pesquisadores em várias partes do mundo dedicou-se à identificação detalhada de culturas agrícolas em fotografias aéreas (STEINER, 1970). A partir de 1860 foram tiradas as primeiras fotografias aéreas usando “papagaios” e balões, não obtendo bons resultados, sendo que a primeira fotografia aérea com resultados foi tirada utilizando um balão em 1887, por Fairman nos EUA. Em 1900 iniciaram-se trabalhos onde tiravam fotografias aéreas com grande ângulo de recobrimento. A partir da década de 60 iniciou-se o uso de imagens orbitais, sendo que a partir de 1972, os estudos ligados ao meio ambiente se desenvolveram mais. Hoje há um uso intensivo, tanto de imagens orbitais como de fotografias aéreas.

O Sensoriamento Remoto é uma forma eficaz de monitoramento ambiental em escalas locais e globais (JACHINTO, 2003). Além disso, os Sistemas de Informação Geográfica (SIG) facilitam o gerenciamento de informações espaciais e permitem a elaboração de diagnósticos e prognósticos, subsidiando a tomada de decisões.

As imagens obtidas por sensores remotos contribuem na identificação desses diferentes usos do espaço terrestre, permitindo acompanhar as transformações do espaço ao longo do tempo (FLORENTINO, 2002), sendo possível estimar fluxos de superfície, como a radiação solar global à superfície que está diretamente relacionada à evapotranspiração, obter o mapeamento do uso da terra, vegetação e impactos ambientais, contribuindo para o monitoramento e planejamento de atividades que provocam ou possam vir a provocar danos futuros ao meio ambiente (ORTIZ; FREITAS, 2005).

Os corpos hídricos são componentes que apresentam potencial para aplicações práticas de Sensoriamento Remoto orbital, tanto pelas suas facilidades em interagir

com a energia eletromagnética, como pela sua importância estratégica. Em áreas submetidas às intervenções humanas, as águas estão sujeitas a diversos impactos que afetam as disponibilidades hídricas quantitativas e qualitativas (MARTINI et al., 2006).

2.4 Modelos hidrológicos

O modelo é a representação de algum objeto ou sistema, numa linguagem ou forma de fácil acesso e uso, com o objetivo de entendê-lo e buscar suas respostas para diferentes entradas. É uma das ferramentas que a ciência desenvolveu, para melhor entender e representar o comportamento da bacia hidrográfica e prever condições diferentes das observadas. A simulação hidrológica é limitada pela heterogeneidade física da bacia e dos processos envolvidos, o que tem propiciado o desenvolvimento de um grande número de modelos que se diferenciam em função dos dados utilizados, discretização, das prioridades da representação dos processos e dos objetivos a serem alcançados (TUCCI, 2005).

As limitações básicas dos modelos hidrológicos são a quantidade e a qualidade dos dados hidrológicos, além da dificuldade de formular matematicamente alguns processos e a simplificação do comportamento espacial de variáveis e fenômenos (TUCCI, 2005).

Existe grande variedade de modelos hidrológicos. Para melhor compreensão de suas finalidades, eles podem ser agrupados em classes segundo algumas de suas características principais:

- **Contínuo e discreto:** o sistema é dito contínuo quando os fenômenos são contínuos no tempo; enquanto que o sistema é discreto quando as mudanças de estado se dão em intervalos de tempo discretos;
- **Concentrado e distribuído:** um modelo é concentrado quando não leva em conta a variabilidade espacial; em geral, modelos concentrados utilizam o tempo como variável independente. Um modelo é dito distribuído quando as variáveis e os parâmetros do modelo dependem do espaço e/ou do tempo;

- **Estocástico e determinístico:** esta é uma das principais classificações dentro da simulação hidrológica. Modelos determinísticos são os modelos em que, para uma mesma entrada, o sistema produz sempre a mesma saída. Estocásticos são aqueles em que o relacionamento entre entrada e saída é estatístico;
- **Conceitual e empírico:** o modelo é dito conceitual, quando as funções utilizadas na sua elaboração levam em consideração os processos físicos. Os modelos empíricos são os que se ajustam valores calculados aos observados através de funções que não tem nenhuma relação com os processos físicos envolvidos.

Na Tabela 2.2 são apresentadas as áreas em que os vários modelos hidrológicos têm sido utilizados dentro do gerenciamento dos recursos hídricos (TUCCI, 2005).

O gerenciamento dos recursos hídricos é, por característica, um campo de ação multidisciplinar. Devido ao grande número de alternativas que existem no planejamento dos recursos hídricos, considerando seus usos, disponibilidades e preservação, é necessário utilizar metodologias que melhor quantifiquem os processos, permitindo auxiliar alternativas, no processo de decisão.

A aplicação de modelos hidrológicos envolve: a escolha do modelo, a seleção e a análise dos dados necessários, ajuste e verificação dos parâmetros (dados para análise, limitações e representatividade das séries hidrológicas, critérios para estimativa dos parâmetros, técnicas de ajuste dos parâmetros), definição de cenários de aplicação, prognóstico e a estimativa das incertezas dos resultados (sobre as variáveis de entrada, na estrutura do modelo, na definição dos parâmetros) (TUCCI, 2005).

Um dos grandes desafios da Hidrologia tem sido o melhor entendimento da escala na qual os processos hidrológicos se desenvolvem. O dilema de escala para o hidrólogo está relacionado com a representação de processos que ocorrem na escala de minutos e centímetros em resultados médios diários em bacias de grande porte (COLLISCHONN; TUCCI, 2001). Os parâmetros estimados em pequena escala no campo dificilmente podem ser aplicados em grande escala.

Todos os modelos necessitam, de alguma forma, o ajuste de seus parâmetros, mesmo que medidos no campo, sendo as principais dificuldades de estimativa dos parâmetros, a estimativa da precipitação. Todas as interações internas podem possuir infinitas combinações que podem distorcer os parâmetros obtidos. Quando o número de

células é muito grande o número de parâmetros pode ser infinito (COLLISCHONN; TUCCI, 2001).

Tabela 2.2 - Relação entre áreas de aplicação e modelos hidrológicos

Área	Principais aspectos de Recursos Hídricos	Principais modelos
Desenvolvimento urbano	Abastecimento de água	Precipitação-vazão; balanço de reservatório; Modelo hidráulico da rede de condutos
	Tratamento de esgotos	Hidráulica da Rede de Coleta; qualidade da água dos rios, reservatórios, lagos e estuários
	Drenagem Urbana e Controle de Cheias	Precipitação-vazão para dimensionamento e previsão de cheias
Energia	Projeto e operação de hidrelétricas	Precipitação-vazão para extensão de série e previsão em tempo real para operação do sistema
Transporte	Navegação	Precipitação-vazão para estimar a vazão
Produção Agrícola	Irrigação	Precipitação-vazão
Controle Ambiental	Impactos de obras hidráulicas Impactos devido a despejo de efluentes Impacto devido a uso do solo rural urbano	Modelos hidráulicos de qualidade da água dos rios
Controle de calamidades	Rompimento de Barragens Cheias Estiagens	Modelos hidráulicos de rompimento de barragens; Modelos precipitação-vazão e vazão-vazão em tempo real para estiagens e cheias
Gerenciamento de Recursos Hídricos	Concessão do uso de água Controle do uso e conservação da água	Modelos precipitação-vazão, regionalização de variáveis hidrológicas
Sistema de Informações	Cadastro de usuários	Modelos hidrológicos para preenchimento de falhas

Fonte: Tucci (2005)

Uma grande variedade de modelos hidrológicos distribuídos tem sido desenvolvido nas últimas décadas, variando de modelos conceituais simples até sistemas complexos de equações diferenciais parciais que requerem sofisticados algoritmos numéricos e computadores potentes, e a característica comum de tais modelos é que eles podem incorporar a distribuição espacial de várias informações e condições de contorno, como topografia, vegetação, uso da terra, características do solo, precipitação e evaporação, e produzir resultados detalhados como umidade do

solo, fluxos subterrâneos e de superfície, distribuição vertical da água no solo, dentre outras (TROCH et al., 2003). Alguns exemplos de modelos hidrológicos desenvolvidos com essas características, pode-se citar: o Variable Infiltration Capacity (VIC-2L), descrito por Liang et al. (1994); o Large Area Runoff Simulation Model (LARSIM), descrito por Bremicker (1998) apud Collischonn (2001); o Modelo de Grandes Bacias (MGB) descrito por Collischonn (2001).

O Modelo de Grandes Bacias (MGB) foi desenvolvido a partir da estrutura do modelo LARSIM com algumas adaptações do modelo VIC-2L, e algumas modificações foram feitas, como a simplificação do módulo de balanço de água no solo, o módulo de evapotranspiração foi desenvolvido de acordo com os textos de Shuttleworth (1993) e Wigmosta et al. (1994) e foi incluída a metodologia de Muskingum-Cunge para a propagação do escoamento nos canais. Este modelo tem sido aplicado em diversas bacias hidrográficas, tanto para simulação quanto para previsão. As bacias em que o modelo já foi ou está sendo aplicado foram: bacia do rio Taquari-Antas (RS), bacia do rio Taquari (MS) e bacia do rio Uruguai (COLLISCHONN, 2001); bacia do rio São Francisco (SILVA, 2005); bacia do rio Madeira (RIBEIRO NETO et al., 2008); entre outras.

Um fator importante que contribui para a popularidade da modelagem distribuída é a disponibilidade de dados de elevação digital (DEM) e algoritmos simples para extração de informações hidrologicamente relevantes a partir destes dados (TROCH et al., 2003).

Outros modelos distribuídos bem conhecidos são SHE (Sistema Hidrológico Europeu – BATHURST et al., 1995) e TOPMODEL (BEVEN et al. 1995) foram desenvolvidos para pequenas bacias, ou seja, escalas da hidrologia de pequenos sistemas (bacias menores do que 1000 km²).

No modelo SHE os processos são descritos por equações que representam um compromisso entre o máximo da sua compreensão teórica atual e a disponibilidade de dados. A bacia é dividida em células na forma de uma grade, e nestas células são definidas as variáveis e as equações são resolvidas por métodos de diferenças finitas. Este modelo exige uma grande quantidade de dados que, teoricamente, podem ser medidos em laboratório ou em experimentos na bacia, embora com altos custos

O modelo TOPMODEL está baseado na hipótese de geração de escoamento distribuído na bacia por excesso de saturação, e, além disso, de que é possível representar esta heterogeneidade na bacia analisando o seu relevo.

Os modelos de circulação atmosféricas global têm sido utilizados para a análise dos processos de grande escala, porém estes modelos são desenvolvidos para representar a atmosfera e são, ainda, inadequados para a descrição dos processos de transporte lateral ou propagação de vazões.

2.5 Parâmetros do modelo que interferem na análise de mudanças do uso e cobertura do solo

Os parâmetros do modelo que são importantes para diferenciar usos e coberturas do solo são: o albedo, o índice de área foliar (IAF), a resistência aerodinâmica (r_a), a resistência superficial (r_s) e o coeficiente de interceptação (α). Além destes, o parâmetro W_m , que determina o máximo armazenamento no solo, e o parâmetro b também devem ser alterados de acordo com os tipos de uso e cobertura do solo.

O sucesso do modelo como ferramenta de análise das consequências das mudanças do uso e cobertura do solo depende da determinação de valores confiáveis para os parâmetros citados acima. Neste sentido é importante analisar a incerteza envolvida na determinação de cada um destes parâmetros.

2.5.1 Índice de Área Foliar (IAF)

A interceptação é considerada dependente da cobertura do solo, expressa pelo índice de área foliar (IAF) da vegetação. O IAF expressa a relação entre a área das folhas de todas as plantas e a área de uma parcela de solo, e pode ser medido. Tem sido associado com a produtividade da vegetação e evapotranspiração em modelo matemáticos (XAVIER; VETTORAZZI, 2004a).

Xavier e Vettorazzi (2003) realizaram o mapeamento do índice de área foliar (IAF) para um microbacia da bacia hidrográfica do rio Piracicaba. O IAF foi medido com um instrumento LAI-2000 em 32 parcelas em campo, em áreas de cana-de-açúcar, pastagem, milho, eucalipto e floresta ripária. Os valores mínimos e máximos de IAF foram 0,47 (cana-de-açúcar) e 4,48 (mata ciliar), respectivamente. Os resultados dos valores de IAF foram: 3,21 e 4,48 para a duas parcelas de floresta ripária; 1,99, 2,78 e 3,11 para as parcelas de eucalipto; para a cana-de-açúcar os IAF variaram de 0,47 a 2,37, sendo que, quando as medidas foram tomadas, as plantas estavam na etapa inicial e intermediária de desenvolvimento; para a pastagem variou de 1,09 a 2,11; e 1,49 e 2,11 para o milho, na fase final desenvolvimento, para as duas parcelas.

Segundo Xavier e Vettorazzi (2003), a variabilidade do IAF para o eucalipto é elevada e depende de muitos fatores, e os valores determinados em seu estudo não estão muito longe de valores determinados em outros estudos.

Xavier et al. (2002) realizaram um levantamento da variação do índice de área foliar em clones de eucalipto ao longo do seu ciclo de crescimento (de 12 a 84 meses), e o IAF variou de 1,72 a 4,31, com uma média de 2,87.

Xavier e Vettorazzi (2004b) realizaram o monitoramento do índice de área foliar para a bacia hidrográfica do Ribeirão dos Marins, localizada no município de Piracicaba, SP, por meio do NDVI derivado de imagens LANDSAT-7/ETM+ de quatro datas, encontrando os seguintes valores mínimos e máximos, respectivamente, de IAF: 0,47 e 2,37 (janeiro), 0,58 e 2,39 (março), 0,16 e 2,53 (agosto) e 0,48 e 2,60 (novembro) para cana-de-açúcar; 1,26 e 1,86 (janeiro) e 1,61 e 2,16 (novembro) para milho; 1,09 e 2,03 (janeiro), 2,06 e 2,45 (março), 0,85 (agosto) e 0,72 e 1,64 (novembro) para pastagem; 1,99 e 3,11 (janeiro), 2,07 e 3,13 (março), 2,00 e 2,52 (agosto) e 1,66 e 2,45 (novembro) para eucalipto; 3,21 e 4,48 (janeiro), 2,89 e 3,90 (março), 1,96 e 2,59 (agosto) e 2,93 e 4,51 (novembro) para floresta ripária.

Em culturas agrícolas o IAF varia ao longo do ano, entre valores próximos a zero na época de preparação do plantio, até valores máximos no momento de máximo desenvolvimento das plantas. Em florestas decíduais e no cerrado o IAF também varia conforme a época do ano, Esta variabilidade é considerada no modelo utilizando

valores mensais do IAF para cada bloco. A eq. (1) expressa a relação entre a capacidade de interceptação e o IAF:

$$S_{IL} = F_i \cdot IAF \quad (1)$$

onde S_{IL} [mm] é a capacidade do reservatório de interceptação; IAF [-] é o índice de área foliar (adimensional) e F_i [mm] é o parâmetro de lâmina máxima de interceptação. O valor de F_i é fixado em 0,2 mm, conforme Wigmosta et al. (1994).

A maior fonte de incerteza na estimativa do IAF é a classificação de uso do solo. Durante a classificação podem ocorrer erros como, por exemplo, classificar algum tipo de cultura anual como floresta. Neste caso será informado ao modelo o IAF de floresta, que é alto durante todo o ano, no lugar do IAF da cultura anual, que é alto apenas durante um ou dois meses (COLLISCHONN, 2001).

2.5.2 Albedo

O albedo é definido como a razão entre a radiância refletida e incidente, e seu valor define a energia que está disponível para o processo de evapotranspiração.

Considerando uma superfície vegetada, o albedo pode variar com o ângulo de elevação solar, tipo de vegetação, condições de umidade da superfície, umidade e tipo de solo, quantidade e tipo de nuvens. A vegetação mais densa reflete menos radiação solar do que a menos densa, portanto, o desmatamento causa, em geral, um aumento do valor do albedo, porque o albedo das florestas é mais baixo do que o da maioria dos outros tipos de cobertura. Em consequência do aumento do albedo, o desmatamento tende a reduzir a evapotranspiração e aumentar o escoamento.

Os valores de albedo podem variar amplamente com a hora do dia, estação, latitude e cobertura de nuvens (SHUTTLEWORTH, 1993). Durante o dia, o albedo decresce com a elevação do sol, alcançando valores máximos próximo ao nascer e por do sol, enquanto os valores mínimos ocorrem em torno do meio dia, quando a

penetração da radiação no dossel vegetativo é maior, aumentando a absorção por espalhamentos múltiplos (LEITÃO et al., 2002).

A Tabela 2.3 apresenta um resumo dos valores de albedo para diversas coberturas vegetais, encontrados por Shuttleworth (1993).

Tabela 2.3 - Valores médios diário de albedo para classes de cobertura do solo (SHUTTLEWORTH, 1993)

Classes de cobertura do solo	Albedo
Água	0,08
Florestas altas	0,11 – 0,16
Cultivos agrícolas altos (ex: cana-de-açúcar)	0,15 - 0,20
Cultivos agrícolas baixos (ex: trigo, soja)	0,20 - 0,26
Gramma e pastagens	0,20 - 0,26
Solo nú	0,10 (úmido) - 0,35 (seco)
Neve e gelo	0,20 (velha) - 0,80 (nova)

Aguiar et al. (2009) mediram valores de albedo médio diário, em áreas de pastagem e de floresta na Amazônia, durante os meses de julho de 2005 e janeiro de 2006 em dois sítios experimentais em Rondônia. Os maiores valores dos albedos médios diários foram encontrados na área de pastagem (média de 0,226), enquanto na área de floresta foi encontrado o valor médio de 0,12.

A Tabela 2.4 apresenta valores de albedo médio mensal encontrado na literatura, para floresta Amazônica e em áreas de pastagem na Amazônia.

Tabela 2.4 - Valores de albedo médio mensal para floresta amazônica e áreas de pastagem na Amazônia

Floresta	Pastagem	Fonte
0,123	-	Shuttleworth et al. (1984)
0,134	0,180	Culf et al. (1995)
0,133	0,178	Wright et al. (1996)
0,132	0,192	Moura et al. (1999)

Resultados de albedo para água foram apresentados por Silva et al. (2005) e Giongo et al. (2010), com valores que variaram entre 0,07 a 0,09 e 0,02 a 0,10, respectivamente.

Medições de albedo em áreas de cana-de-açúcar foram feitas por Mendonça (2007) na região Norte Fluminense/RJ, e por Gomes et al. (2009) e Giongo et al. (2010) na região do município de Santa Rita do Passa Quatro/SP, tendo-se obtido uma variação entre 0,14 e 0,23.

2.5.3 Resistência aerodinâmica

A resistência aerodinâmica atua no controle da evapotranspiração. Quanto maior o valor deste parâmetro, menor é o fluxo de evapotranspiração. No modelo hidrológico a resistência aerodinâmica é relacionada à velocidade do vento e à altura média da vegetação. A resistência aerodinâmica é considerada menor em florestas, onde a altura média da vegetação é maior e intensifica a turbulência do vento. A análise de sensibilidade mostrou que, dentro de uma faixa de incerteza definida pelos valores de diferentes fontes bibliográficas (SHUTTLEWORTH, 1993), a resistência aerodinâmica tem pouca influência sobre os resultados.

2.5.4 Resistência superficial

A resistência superficial controla o processo de transpiração. Este parâmetro representa o processo do fluxo da água do solo, pelo interior da planta, até o exterior das folhas. Quanto maior a resistência superficial, menor é a transpiração. De acordo com Shuttleworth (1993), a resistência superficial em florestas é de aproximadamente 100 s.m^{-1} e, em pastagens, de aproximadamente 70 s.m^{-1} . As culturas anuais apresentam valores de 40 e 200 s.m^{-1} , dependendo do estágio vegetativo.

A transpiração é calculada considerando os valores de resistência superficial e resistência aerodinâmica, adequados para o tipo de cobertura vegetal. A resistência

superficial depende da disponibilidade de água no solo. Em condições favoráveis, os valores de resistência superficial são mínimos.

2.5.5 Capacidade de armazenamento de água no solo

De acordo com Cassel e Nielsen (1986), a capacidade de armazenamento de água no solo pode ser definida como a diferença entre o conteúdo de água na capacidade de campo e no ponto de murcha permanente.

A capacidade de campo é a água retida em um solo úmido após a drenagem por gravidade, e geralmente assume-se que ela corresponde ao conteúdo de água no solo retido a um potencial matricial de -33KPa . O ponto de murcha é o conteúdo de umidade do solo abaixo do qual as plantas não se recuperam, geralmente correspondente a um potencial matricial de -1500 KPa . Além disso, a capacidade de armazenamento de água no solo é determinante na evapotranspiração.

O parâmetro W_m depende do tipo de solo e do tipo de vegetação, pois depende da profundidade em que as raízes das plantas podem recuperar a água infiltrada. A diferença do parâmetro W_m em diferentes coberturas vegetais ocorre, por exemplo, em raízes das árvores das florestas que atingem profundidades maiores e, portanto, retiram água em profundidades maiores. Hodnett et al. (1996) fizeram medições de umidade do solo em locais com floresta e pastagem na Amazônia e encontraram diferenças no armazenamento de água no solo para florestas, de aproximadamente 700 mm em 3,6 m de solo, e para pastagem 400 mm para a mesma profundidade de solo.

Solos com pequena profundidade influenciam menos no processo de escoamento devido a sua pequena capacidade de infiltração. Bacias onde a profundidade do solo e a capacidade de armazenamento do aquífero são pobres, a retirada da cobertura não apresentará grandes alterações nas condições de estiagem (TUCCI, 2005).

Xue et al. (1996), comparando observações de umidade do solo com resultados de modelagem, mostraram que as propriedades hidráulicas do solo têm um impacto profundo nos modelos de simulação.

O parâmetro W_m tem uma base física, porém existem grandes incertezas associadas a sua medição direta, utilizando dados medidos no campo. Além disso, a determinação direta ou em laboratório do parâmetro W_m não é uma tarefa fácil, pois é dispendiosa e demanda tempo.

A Figura 2 apresenta a mapa da capacidade de armazenamento de água no solo, em mm, para o primeiro metro do solo para o Brasil obtido no estudo realizado por Rossato (2001), que elaborou um balanço hídrico de todo o território brasileiro, utilizando uma expressão simplificada, em função da capacidade de água disponível no solo para as plantas, da precipitação e da evapotranspiração real da cobertura vegetal, sendo a capacidade de água disponível no solo obtida a partir da estimativa da capacidade de campo e do ponto de murcha utilizando-se funções de pedo-transferência (FPT). Tais funções permitem estimar as propriedades hidráulicas a partir de dados básicos dos solos, como, por exemplo, o percentual de areia, de silte, de cascalho e de matéria orgânica, conteúdo de carbono e massa específica global.

É importante ressaltar que as funções de pedo-transferência derivadas de dados da região de solos de clima temperado, apresentam limitações quando aplicada aos solos tropicais (TOMASELLA et al., 2000). Tomasella e Hodnett (1998) mostraram que, em muitos casos, a textura de solos tropicais, particularmente os latossolos tais como os da Amazônia, estão fora da faixa dessas funções de pedo-transferência. Como resultado, as estimativas de retenção de água podem ter erros significativos, ou podem falhar totalmente, por exemplo, indicando um teor de água na capacidade de campo que é maior do que a saturação.

Figura 2 - Capacidade de armazenamento de água no solo, em mm, para o primeiro metro do solo para o Brasil. Fonte: Rossato (2001)

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Descrição da área de estudo

Esta pesquisa foi conduzida na bacia hidrográfica do rio Piracicaba, que possui uma área total de 12.568,72 km², pertencente às bacias do Piracicaba, Capivari e Jundiaí (PCJ), sendo que, 11.442,82 km² encontram-se no estado de São Paulo, e 1.125,90 km² no estado de Minas Gerais. Está localizada entre os paralelos 22°00' e 23°30' de latitude Sul e os meridianos 46°00' e 48°30' de longitude Oeste. A Figura 3 apresenta a localização geográfica da bacia do rio Piracicaba em relação ao estado de São Paulo.

Figura 3 - Localização geográfica da bacia do rio Piracicaba no estado de São Paulo

A bacia do rio Piracicaba apresenta uma vazão média de 144,3 m³/s e vazão mínima de 35,7 m³/s, obtidas com base nos estudos de regionalização hidrológica feitos pelo DAEE em 1988 e 1994 e adaptados pelo Relatório de Situação dos Recursos Hídricos das Bacias dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí – 2002/2003 (AGÊNCIA

NACIONAL DE ÁGUAS, 2007). Em estudo apresentado por Mortatti et al. (2004), para o período entre 1944 e 1997, a vazão média anual para o rio Piracicaba foi de 140,4 m³/s.

A bacia do rio Piracicaba é uma importante bacia hidrográfica do sudeste brasileiro, fazendo parte da bacia do rio Tietê em sua porção média. Está subdividida em cinco sub-bacias: Piracicaba (3.700,79 km²); Corumbataí (1.679,19 km²); Jaguari (3.290 km²); Camanducaia (1.030 km²); e Atibaia (2.868,74 km²). É constituída de 61 municípios, localizados nos estados de São Paulo e Minas Gerais. Os dez municípios mais populosos, em ordem decrescente, são: Campinas, Piracicaba, Jundiaí, Limeira, Sumaré, Americana, Rio Claro, Hortolândia, Santa Bárbara d'Oeste e Indaiatuba (IRRIGART, 2004).

Apresenta um desnível topográfico de cerca de 1.250 m em uma extensão aproximada de 250 km, desde suas cabeceiras na Serra da Mantiqueira, no estado de Minas Gerais, até a sua foz no Rio Tietê, mais especificamente no Reservatório de Barra Bonita, na divisa entre os municípios de Dois Córregos (fora das bacias PCJ) e Botucatu (com sede fora das bacias PCJ) e Santa Maria da Serra (IRRIGART, 2004).

O crescimento econômico, seguido pelo desenvolvimento urbano, criou problemas ambientais graves na bacia do rio Piracicaba, principalmente em relação aos recursos hídricos (GALLO, 2001). A bacia do rio Piracicaba passou, desde a década de 1960, por intenso processo de urbanização e industrialização, com incremento das fontes de poluição e do consumo de água para abastecimento da população, para uso dos setores produtivos industrial e agrícola (Agência Nacional das Águas, 2007), criando uma crescente preocupação quanto à qualidade e à quantidade de seus recursos hídricos e quanto à variabilidade de alguns elementos climáticos (PELLEGRINO et al., 2001). De acordo com o Relatório de Situação dos Recursos Hídricos 2002/2003, o maior usuário interno de água para captação na bacia do rio Piracicaba é o setor urbano, com 44% do total; posteriormente, o setor industrial, com 37%; e o setor rural com 19%, no total, a demanda de águas superficiais na bacia era de 31,1 m³/s.

A agricultura tem apresentado crescimento no território paulista, nas últimas décadas, com a intensificação do uso do solo e o aumento da produtividade, ou ainda pela substituição de atividades. Na porção paulista da bacia do rio Piracicaba há o

predomínio da produção de cana-de-açúcar, em torno da qual se formou um complexo agroindustrial de açúcar e álcool, com um parque industrial diversificado que inclui destilarias de álcool e usinas de açúcar, indústrias de alimentos e de bens de capital, e muitas outras. As Regiões de Governo de Piracicaba e de Rio Claro são referências da agroindústria sucroalcooleira no estado de São Paulo. A Figura 4 apresenta a produção (toneladas) da cana-de-açúcar no estado de São Paulo de 1990 a 2008. Na porção mineira, os municípios de Camanducaia, Extrema, Itapeva e Toledo destacam-se na pecuária (corte e leiteira) e nas culturas de batata, milho e feijão (CPTI, 2008).

Figura 4 - Produção da cana-de-açúcar no estado de São Paulo
Fonte: UNICA e MAPA

O desenvolvimento da agricultura também está associado às características climáticas da região, que não apresenta restrições acentuadas, relacionadas às temperaturas máximas e mínimas ou à pluviometria, a ocorrência de geadas é esporádica e restrita a algumas microrregiões, não ocorre um período prolongado de deficiência hídrica, o que explica a existência de uma área irrigada relativamente pequena (à exceção das hortaliças) (IRRIGART, 2004).

A Figura 5 apresenta a evolução da área plantada (Km²) das principais culturas da região da bacia do rio Piracicaba: cana-de-açúcar, laranja, milho, café e feijão, obtidos do IBGE, para quase todas as cidades da região. Podemos notar o predomínio da cana-de-açúcar na região.

Figura 5 - Evolução da área plantada com as principais culturas na região da bacia do rio Piracicaba
Fonte: IBGE

Vale ressaltar, que no período de 2005 a 2008, a área de cana-de-açúcar no Brasil expandiu em 44,2%, aumentando de 6,1 para 8,7 milhões ha. Neste mesmo período, o Estado de São Paulo aumentou a área de cana-de-açúcar em 44,9%, o que corresponde a um aumento de 1,5 milhão ha, e tem atualmente 55,7% da área de cana-de-açúcar cultivada no Brasil (CANASAT, 2008). De acordo com os dados do CANASAT, a área cultivada de cana-de-açúcar na bacia do rio Piracicaba, aumentou 24,4% entre as safras 2003/04 e 2008/09, que representa 52,5 mil ha.

A bacia do rio Piracicaba também conta com uma peculiaridade muito importante, quando se trata da disponibilidade hídrica: a presença do Sistema Cantareira. Foi concebido na década de 1960 para atender a uma demanda crescente na Região Metropolitana de São Paulo, que atraía enorme fluxo migratório e

concentrava importantes atividades econômicas. A água vem das nascentes da bacia do rio Piracicaba, mananciais que ficam a mais de 100 km de distância, na Serra da Mantiqueira (MG). É constituído pelos reservatórios formados pelos barramentos nos rios Jaguari, Jacareí, Cachoeira e Atibainha, da bacia do rio Piracicaba, e pelo reservatório Paiva Castro, criado pelo barramento no rio Juqueri, da Bacia do Alto Tietê (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS, 2007).

A autorização para a derivação de água para a Região Metropolitana de São Paulo, de até 33 m³/s, foi dada por Portaria do Ministério das Minas e Energia em agosto de 1974, estabelecendo um prazo de 30 anos de vigência da outorga. Em 2004, a Agência Nacional de Águas (ANA) e o Departamento de Água e Energia (DAEE), com ativa participação dos Comitês PCJ, fixaram novas condições de operação do Sistema Cantareira, após intenso processo de negociação. Dos 33 m³/s produzidos pelo sistema, apenas 2m³/s são produzidos na Bacia do Alto Tietê, pelo rio Juqueri. Dos 31 m³/s produzidos na Bacia do Rio Piracicaba, 22 m³/s vêm dos reservatórios Jaguari-Jacareí, cujas bacias estão inseridas no estado de Minas Gerais (CPTI, 2008).

A retirada de água da bacia do rio Piracicaba para o abastecimento da grande São Paulo é a mais provável causa da tendência negativa na vazão em todos os rios estudados nessa bacia (GROPPO et al., 2005).

Um estudo estatístico foi feito por Moraes et al. (1997) para avaliar as principais alterações na evolução das séries anuais de vazão dos três principais rios da bacia do Piracicaba, sejam eles, rio Atibaia, rio Jaguari e rio Piracicaba, entre 1930 e 1995. Como resultados, detectaram que a partir dos anos 60, as vazões do rio Atibaia, e, a partir dos anos 70, nas vazões do rio Jaguari e Piracicaba, esses rios passaram a apresentar vazões com a mesma alternância, mas com valores abaixo do período precedente. Essas mudanças foram detectadas pelo teste de Pettitt, nos rios Atibaia e Jaguari em 1962 e 1977, respectivamente, mas não na série do rio Piracicaba, cujo decréscimo na vazão não é abrupto como o dos outros rios. Tal tendência negativa nas vazões foi confirmada pelo teste de Mann-Kendall, sendo que estas se tornaram estatisticamente significativas em 1975, 1979 e 1986, para os rios Atibaia, Piracicaba e Jaguari, respectivamente.

De acordo com Moraes et al. (1997), tais alterações no comportamento das séries temporais, detectadas pelos testes estatísticos, coincidem com o histórico da construção do Sistema Cantareira e sua operação, ou seja, a retirada de água para o abastecimento da cidade de São Paulo, iniciada em 1976 no Atibaia e em 1981 no Jaguari, ambos com reflexo no Piracicaba. Estas alterações vem provocando uma diminuição da vazão, estatisticamente significativa no período estudado.

Em outro estudo exploratório das séries anuais de vazão realizado na bacia do rio Piracicaba, por Mortatti et al. (2004), para o período entre 1944 e 1997, as amostragens de vazão foram realizadas no distrito de Ártemis, (área de drenagem de 11.430 km²). Os autores verificaram, pelo teste de Mann-Kendall, uma tendência negativa para os últimos vinte anos, porém não estatisticamente significativa. Também não houve uma ruptura na série histórica, o que foi confirmado pelo teste de Pettitt.

A quase totalidade da bacia hidrográfica apresenta clima subtropical Cwa, segundo a classificação de Köppen, com temperaturas médias anuais entre 18°C e 22°C. A precipitação média anual da bacia é de 1.400 mm, com regime climático caracterizado por duas estações bem distintas: seca no inverno (meses de abril a setembro) e chuvosa no verão (outubro a março) (IRRIGART, 2004).

Pellegrino et al. (2001), num estudo da variabilidade espaço-temporal de componentes hidroclimáticos na bacia do rio Piracicaba, no período de 1947 a 1991, detectaram: uma tendência crescente da precipitação na bacia total, começando a se tornar significativa após 1975; uma tendência crescente na evapotranspiração em todas as sub-bacias, com exceção da sub-bacia do rio Piracicaba, que também apresentou uma tendência crescente, mas a mesma não foi estatisticamente significativa; e para as vazões reconstituídas nenhuma tendência foi detectada.

De acordo com Pellegrino et al. (2001), o aumento observado na evapotranspiração poderia ser devido ao aumento na precipitação. No entanto, as variáveis que interferem no processo de evapotranspiração são inúmeras e não permitem uma pressuposição tão simplista. Contudo, fizeram algumas especulações, como: aumento da temperatura do ar, mudanças no uso da terra, entre outros.

3.2 Dados hidrológicos e meteorológicos

Para o desenvolvimento da pesquisa foram necessários os dados hidrológicos e meteorológicos diários, de 1972 a 2008, que incluem dados de vazão, precipitação, temperatura do ar, umidade relativa do ar, velocidade do vento, pressão atmosférica e radiação solar. Os dados foram obtidos do Departamento de Águas e Energia Elétrica – DAEE, Agência Nacional de Águas – ANA, Instituto Agronômico de Campinas – IAC, Centro de Análise e Planejamento Ambiental – CEAPLA/UNESP/Rio Claro, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – ESALQ/USP, e Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos – CPTEC/INPE.

Os dados de vazão observados correspondem a dados medidos diretamente nos postos fluviométricos. Inicialmente foram identificados 20 postos fluviométricos com dados de vazão na bacia, pertencentes ao DAEE e à ANA. Para seleção dos postos fluviométricos adotou-se como critério preliminar de escolher os postos com área de drenagem maior ou igual a 600 km². Devido à grande extensão da bacia e pelo fato de o modelo hidrológico apresentar melhor resposta quanto maior for a dimensão da bacia (COLLISCHONN; TUCCI, 2001). Também foi feita uma análise gráfica para identificar o período de falhas nos dados de cada posto, em que foram excluídos os postos que apresentaram um período muito grande de falhas. Além disso, postos que estavam muito próximos uns dos outros foram considerados desnecessários para a análise. Assim, restaram 12 postos, cuja espacialização está na Figura 3. No APÊNDICE A é apresentada uma tabela identificando as falhas existentes (entre 1972 e 2008), nos dados de vazão para cada posto fluviométrico utilizado.

Foram identificados 61 postos pluviométricos com dados, pertencentes à rede pluviométrica do DAEE, dentro e fora dos limites da bacia. Foi feita uma análise gráfica para identificar o período de falhas nos dados de cada posto; entretanto, nenhum posto foi descartado. Na Figura 6 é apresentada a localização de todos os postos pluviométricos. No APÊNDICE B é apresentada a relação das estações pluviométricas utilizadas.

As estações meteorológicas possuem registros de variáveis como temperatura, umidade relativa, velocidade do vento, pressão atmosférica, radiação solar ou

insolação. Foram identificadas 11 estações meteorológicas com dados, pertencentes ao IAC, ESALQ e a CEAPLA/UNESP, porém devido ao grande número de falhas nos dados, apenas quatro estações foram selecionadas, localizadas nos municípios de Campinas, Piracicaba, Rio Claro e Vargem. Além das estações meteorológicas, foram utilizados dados interpolados diários de temperatura, umidade relativa, velocidade do vento, pressão atmosférica, radiação solar incidente, gerados a partir da base de dados do CPTEC, para a área de estudo, numa malha de 5 km ($0,05^\circ$), resultando em 430 postos. Entretanto, foram selecionados apenas 16 postos. Os dados obtidos correspondem aos períodos de 1972 a 1978, e 1982 a 2008, existindo uma falha de três anos (entre 1979 e 1981) para todas as variáveis acima citadas, exceto a radiação que possui uma falha maior, correspondente ao período de 1975 a 1981. Assim, 20 postos meteorológicos foram utilizados nesta pesquisa (Figura 6).

Além dos dados diários, dados médios mensais para as variáveis climáticas (temperatura, umidade relativa, velocidade do vento, pressão atmosférica, e radiação solar) também foram utilizados, pois, caso haja falhas nos dados diários, o modelo utiliza dados mensais.

Figura 6 - Localização dos postos pluviométricos, meteorológicos e fluviométricos na bacia do rio Piracicaba

Foi verificada a existência de alguma anomalia nos dados interpolados de temperatura, umidade relativa, velocidade do vento, pressão atmosférica e radiação solar, na geração de mapas interpolados mensais, de cada variável, para cada ano (1972 a 2008) utilizando o programa OpenGRADS. A Figura 7 apresenta um exemplo.

O modelo hidrológico MGB original utiliza dados de insolação. Entretanto, neste estudo foram utilizados dados de radiação solar incidente. Para isso, algumas alterações na entrada dos dados climáticos do modelo hidrológico foram feitas. Na rotina “Radiação” do modelo hidrológico, houve uma modificação nos cálculos da radiação líquida, onde a equação (2) foi substituída pela equação (3).

$$RAD = STO * (0,25 + 0,5 * SOLX / HM) \quad (2)$$

$$SOL = ((RADX / STO) - 0,25) * (HIM / 0,5) \quad (3)$$

em que RAD é a radiação que chega à superfície (MJ/m²/dia); STO é a radiação solar no topo da atmosfera (MJ/m²/dia); SOL é a insolação (horas) e HIM é a máxima duração da insolação (horas).

Figura 7 – Mapas interpolados gerados no OpenGRADS para o mês de janeiro de 1972: temperatura (a); umidade relativa (b); velocidade do vento (c); radiação solar (d) e pressão atmosférica (e)

3.2.1 Dados do Sistema Cantareira

O Sistema Cantareira foi inaugurado em dezembro de 1973 e começou a operar em 1974, com o objetivo de incrementar o abastecimento da Grande São Paulo. A água vem das nascentes da bacia do rio Piracicaba, mananciais que ficam a mais de 100 km de distância, na Serra da Mantiqueira (MG). As barragens do Sistema Cantareira são operadas pela SABESP (Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo, 2010).

O sistema é composto por seis grandes represas e 48 km de túneis e canais. O início de operação de cada represa deu-se em períodos diferentes. O sistema Jaguari-Jacareí iniciou em maio de 1982; o reservatório de Cachoeira em novembro de 1974; e o reservatório de Atibainha em fevereiro de 1975. Os represamentos estão situados em diferentes níveis e são interligados de tal maneira que, do Jaguari e Jacareí, as águas passam, por gravidade, pela represa Cachoeira, Atibainha e Juqueri, e chegam à Estação Elevatória de Santa Inês, onde todo o volume produzido é bombeado para a represa de Águas Claras, construída no alto da Serra da Cantareira. Desta represa as águas passam, por gravidade, para a Estação de Tratamento de Guaraú. A Figura 8 ilustra como um fluxograma simplificado do Sistema Cantareira.

As interligações entre as represas são feitas por túneis e canais. Entre as represas do Jaguari e a do Jacareí há um canal de 670 metros de extensão. A represa do Jacareí e a do Cachoeira são ligadas por um túnel (7) de 5,9 km. Outro túnel (6), este de 4,8 km, faz a ligação entre as represas do Cachoeira e Atibainha. Mais um túnel (5), de 9,9 km, liga a represa do Atibainha à represa do Juqueri, e esta é ligada à Estação Elevatória de Santa Inês – ESI por um túnel de 1 km.

Como a retirada de água na bacia do rio Piracicaba interfere nas vazões dos rios, os dados do Sistema Cantareira foram imprescindíveis nesta pesquisa. Os dados diários foram fornecidos pela SABESP, de 1982 a 2008, e estão divididos em vazões de retirada (liberada para região metropolitana de São Paulo), referente aos túneis 7, 6 e 5, e vazões liberadas à jusante das represas de Jaguari-Jacareí, Cachoeira e Atibainha. Na Figura 9 é apresentada a localização das represas e dos túneis na bacia do rio Piracicaba.

Figura 8 - Fluxograma simplificado do Sistema Cantareira
 Fonte: Plano de bacias 2004-2007

Figura 9 - Localização das represas e túneis do Sistema Cantareira na bacia do rio Piracicaba, e os pontos de vazão retirada e liberada a jusante de cada represa

3.3 Modelo Numérico do Terreno da bacia do rio Piracicaba

Na execução deste trabalho foi utilizado o Modelo Numérico do Terreno (MNT), disponibilizado pelo USGS (<http://srtm.csi.cgiar.org>), com resolução de 90 m. Entretanto, para sua utilização, a resolução foi alterada para 100 m (Figura 10).

A partir do Modelo Numérico do Terreno, as primeiras etapas da pesquisa foram realizadas. Através do MNT foram feitas: a determinação das áreas de drenagem acumuladas; a extração dos comprimentos e declividades dos trechos de rio; a geração das direções de fluxo das células; a geração da rede drenagem; e a delimitação da bacia e sub-bacias. Todas as etapas foram feitas no programa Fortran, conjuntamente com o software Idrisi.

A altitude varia de 443 a 2020 m acima do nível do mar, conforme pode ser observado na Figura 10.

Figura 10 - Modelo Numérico do Terreno (MNT) da bacia do rio Piracicaba

3.4 Mapa pedológico da bacia do rio Piracicaba

Foram utilizados o mapa pedológico digital do Estado de São Paulo, cedido pelo IAC, e o mapa de solo digital do Estado de Minas Gerais, fornecido pelo Geominas, ambos produzidos em escala 1:1.000.000.

Devido à grande variedade de solos encontrados, procurou-se agrupar os tipos de solos que apresentam características físicas semelhantes, sob o ponto de vista do comportamento hidrológico. Na Tabela 1 são apresentados os quatro grupos de solos resultantes deste trabalho e as características físicas consideradas para agrupá-los.

Conforme a Tabela 3.1, as características consideradas para agrupar os diferentes tipos de solos foram: profundidade, capacidade de drenagem, textura e tipo de relevo. Tais características condicionam fortemente o comportamento hidrológico da bacia, pois refletem a maior ou menor capacidade de armazenamento de água e a aptidão do solo em produzir escoamento superficial e/ou subterrâneo.

Tabela 3.1 - Principais grupos de solos na bacia do rio Piracicaba, de acordo com as características que influenciam o comportamento hidrológico

Grupos de Solos	Profundidade	Drenagem	Textura	Relevo	
1	Cambissolos	raso a profundo	bem até imperfeitamente	média, argilosa ou muito argilosa	suave ondulado
	Neossolos	raso a pouco profundo	imperfeita	arenosa a argilosa	plano a forte ondulado
2	Gleissolos	profundo	mal ou muito mal	média, argilosa ou muito argilosa	plano
	Organossolos	raso a pouco profundo	mal ou muito mal	argilosa	plano
	Planossolos	pouco profundo	mal ou imperfeitamente	arenosa ou média(hor.A) e média ou argilosa (hor. B)	plano
3	Latossolos	profundo	fortemente a bem	média, argilosa ou muito argilosa	plano a suave ondulado
	Nitossolos	profundo	bem	argilosa ou muito argilosa	forte ondulado e ondulado
4	Argissolos	raso a profundo	forte a imperfeitamente	arenosa/argilosa (hor.A) e média/muito argilosa (hor.B)	ondulado a forte ondulado

No primeiro grupo estão todos os Cambissolos e os Neossolos. Os Cambissolos caracterizam-se por serem rasos a profundos, bem até imperfeitamente drenados, textura média, argilosa ou muito argilosa. Geralmente os Cambissolos ocorrem em relevo ondulado, por isso são muito erodíveis, e com grande suscetibilidade à compactação, devido aos elevados teores de argila e/ou silte. Os Neossolos caracterizam-se por sua reduzida espessura, raso a pouco profundo, textura arenosa a argilosa e drenagem imperfeita. São solos com alta erodibilidade, devido à reduzida espessura, não permitindo a infiltração de água. Podem ocorrer em relevo plano a fortemente ondulado.

O segundo grupo inclui os Gleissolos, Organossolos e os Planossolos. Os Gleissolos são solos hidromórficos, que caracterizam-se por serem profundos, textura média, argilosa ou muito argilosa, mal drenados ou muito mal drenados. Ocorrem em terrenos planos e, normalmente, apresentam excesso de umidade durante o período chuvoso, e no período de estiagem tornam-se secos e excessivamente duros. Os Organossolos caracterizam-se por serem rasos a pouco profundos, textura arenosa a argilosa e drenagem imperfeita, e ocorrem em relevo plano. Os Planossolos caracterizam-se por serem pouco profundos, textura variável, arenosa ou média (hor. A) e média ou argilosa (hor. B), drenagem mal ou imperfeita, e ocorrem em relevo plano.

No terceiro grupo estão todos os Latossolos e os Nitossolos. Os Latossolos caracterizam-se por serem profundos, de textura média, argilosa ou muito argilosa, fortemente a bem drenados, características que propiciam uma grande capacidade de armazenamento de água. Ocorrem em terrenos planos ou suavemente ondulados, favorecendo a mecanização agrícola. Os Nitossolos caracterizam-se por serem profundos, de textura argilosa a muito argilosa e bem drenados. Ocorrem em relevo ondulado a forte ondulado, por isso são erodíveis, e são solos com grande suscetibilidade à compactação devido aos elevados teores de argila.

O quarto grupo inclui os Argissolos, que têm profundidades variadas, de raso a profundo, e ampla variabilidade de classes texturais nos horizontes A e B, porém, com predomínio de textura média na superfície e argilosa, na subsuperfície, com presença ou não de cascalhos, portanto a drenagem pode variar de forte a imperfeitamente drenados. Os Argissolos são muito suscetíveis à erosão devido à rápida infiltração de

água no horizonte A e lenta no horizonte B; por isso, o excesso que não infiltra escorre superficialmente causando erosão. Ocorrem nos mais variados relevos, podendo variar de ondulado a fortemente ondulado.

O mapa com a classificação dos grupos de solos na bacia é apresentado na Figura 11, e na Tabela 3.2 são apresentadas as proporções da área total, ocupadas por cada um dos grupos definidos neste item.

Tabela 3.2 - Área ocupada pelos principais grupos de solos na bacia do rio Piracicaba

Grupo	Nome	Área (%)
1	Cambissolos e Neossolos	9,22
2	Gleissolos, Organossolos e Planossolos	1,35
3	Latossolos e Nitossolos	39,58
4	Argissolos	43,64
5	Área urbana	4,35
6	Água	1,86
Total		100,00

Figura 11 - Classificação dos grupos de solos na bacia do rio Piracicaba

3.5 Mapas de Uso e Cobertura do Solo da bacia do rio Piracicaba

Foram obtidos cinco mapas de uso e cobertura do solo de diferentes anos, para posteriormente serem combinados com o mapa de solos.

Os mapas de 1978, 1985, 1993 e 1997 foram elaborados pelo Projeto PIRACENA. O mapa de uso e cobertura do solo de 1978, foi obtido pela digitalização manual das cartas de uso do solo do Instituto Geográfico e Cartográfico do Estado de São Paulo (1980, 1981), escala 1:250.000. Os outros mapas foram derivados pela classificação digital de seis cenas de Landsat5-TM (bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7) obtidas junto ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

Um mapa de uso e ocupação do solo de 2003, apresentado no Relatório de Situação dos Recursos Hídricos das bacias dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí de 2002/2003, foi elaborado pela IRRIGART (2004). Para a obtenção do mapa de uso e ocupação foram utilizadas três cenas de imagens de satélite Landsat7 – ETM+, datadas de maio de 2003.

Todos os mapas obtidos estavam classificados em 10 categorias de uso e ocupação do solo e, posteriormente, as classes menos frequentes foram reagrupadas, resultando em cinco categorias de uso e ocupação do solo.

Nas Figuras 12 a 16 estão apresentados todos os mapas. Na Tabela 3.3 são apresentadas as proporções da área total da bacia, ocupadas por cada uma das classes de uso e ocupação do solo para os cinco mapas utilizados neste trabalho.

Tabela 3.3 - Porcentagem de área ocupada pelas principais classes de uso e ocupação do solo na bacia do rio Piracicaba

Número	Classe	Área (%)				
		1978	1985	1993	1997	2003
1	Água	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7
2	Área urbana	1,5	2,8	4,3	5,7	5,6
3	Cana-de-açúcar, Culturas Perenes e Anuais	28,4	36,0	37,2	35,1	36,8
4	Pastagem e Solo exposto	57,8	53,3	48,7	43,8	40,8
5	Silvicultura e Floresta	10,6	6,2	8,1	13,6	15,1
Total		100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Figura 12 - Mapa de uso e cobertura do solo na bacia do rio Piracicaba para o ano de 1978
Fonte: Projeto Piracena

Figura 13 - Mapa de uso e cobertura do solo na bacia do rio Piracicaba para o ano de 1985
Fonte: Projeto Piracena

Figura 14 - Mapa de uso e cobertura do solo na bacia do rio Piracicaba para o ano de 1993
Fonte: Projeto Piracena

Figura 15 - Mapa de uso e cobertura do solo na bacia do rio Piracicaba para o ano de 1997
Fonte: Projeto Piracena

Figura 16 - Mapa de uso e cobertura do solo na bacia do rio Piracicaba para o ano de 2003

Fonte: IRRIGART (2004)

3.6 Ajuste do modelo hidrológico a bacia do rio Piracicaba

3.6.1 Geração da rede de drenagem

A partir do Modelo Numérico do Terreno foram obtidas as direções de fluxo e, posteriormente, foi gerada a rede de drenagem, que é a representação da ordem hierárquica das células. A bacia foi dividida em células de 5 Km x 5 Km, resultando num total de 430 células. A Figura 17 apresenta a rede de drenagem obtida para toda a bacia do rio Piracicaba, definida pelas linhas de cor branca e os pontos pretos são postos fluviométricos utilizados como referência para cálculo das áreas de drenagem. As áreas com cores diferentes representam as bacias controladas por um dos postos definidos para serem utilizados no processo de calibração e verificação do modelo hidrológico. Na Tabela 3.4 tem-se a relação das sub-bacias adotadas, com os postos fluviométricos de controle e as áreas de drenagem correspondentes.

Figura 17 - Discretização e rede drenagem obtida para a bacia do rio Piracicaba e sub-bacias selecionadas para ajuste do modelo hidrológico

Tabela 3.4 - Sub-bacias consideradas para a calibração e verificação do modelo hidrológico, na bacia do rio Piracicaba

Sub-bacia	Posto Fluviométrico	Rio	Área de Drenagem (km ²)
01	Pires	Jaguari	958
02	Buenópolis	Jaguari	1.945
03	Amparo	Camanducaia	667
04	Fazenda Barra	Camanducaia/Guardinha	957
05	Usina Ester	Jaguari	3.367
06	Atibaia	Atibaia	1.134
07	Bairro da Ponte	Atibaia	1.948
08	Acima de Paulínia	Atibaia	2.731
09	Carioba	Piracicaba	7.228
10	Piracicaba	Piracicaba	8.882
11	Recreio	Corumbataí	1.563
12	Artemis	Piracicaba	10.909
13	Foz	Piracicaba	12.474

3.6.2 Blocos de tipo e uso do solo

Cada célula foi dividida em nove blocos, cada um representando uma classe de tipo e uso do solo, ou seja, as informações de uso do solo e de tipos de solos foram combinadas com o objetivo de gerar os blocos, em que são subdivididas as células do modelo hidrológico. A combinação dos oito grupos de solos com as nove classes de uso resultou em 72 classes combinadas. As classes menos frequentes foram reagrupadas de forma a diminuir o número de blocos utilizados na simulação hidrológica, resultando em nove blocos de tipos e usos do solo. A combinação foi feita para os mapas de uso e cobertura do solo de todos os anos, conforme a Figura 18. A Tabela 3.5 apresenta as proporções de cada bloco.

Tabela 3.5 - Blocos de tipos de solos e usos do solo da bacia do Rio Piracicaba, considerados na modelagem hidrológica

Bloco	Descrição	Fração da área da bacia (%)				
		1978	1985	1993	1997	2003
1	Agricultura+Solo pouco profundo/mal drenado	0,75	1,14	1,17	1,06	1,09
2	Agricultura+Solo raso a profundo/bem a imperfeitamente drenado	13,78	16,29	17,47	16,77	18,11
3	Agricultura+Solo profundo/fortemente drenado	13,91	18,44	18,51	17,20	17,57
4	Pastagem+Solo raso a profundo/imperfeitamente drenado	36,54	33,14	30,42	27,36	26,19
5	Pastagem+Solo profundo/fortemente drenado	21,50	20,00	18,18	16,33	14,64
6	Floresta e Reflorestamento+Solo raso a profundo/imperfeitamente drenado	5,91	3,45	4,52	7,74	8,16
7	Floresta e Reflorestamento+Solo profundo/fortemente drenado	4,68	2,75	3,52	5,83	6,89
8	Área urbana	1,52	2,82	4,31	5,74	5,63
9	Água	1,40	1,97	1,91	1,97	1,72
Total		100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

Figura 18 - Blocos do modelo para a bacia do rio Piracicaba, resultantes da combinação das classes de tipos e uso do solo de 1978 (a); 1985 (b); 1993 (c); 1997 (d); e 2003 (e)

Em termos de tipo de solo, o solo profundo tem uma predominância maior por toda a bacia. Porém, o bloco com a maior ocorrência é o 4 (Pastagem+Solo raso a profundo/imperfeitamente drenado), para todos os anos. O bloco 1 (Agricultura+Solo pouco profundo/mal drenado), apesar de apresentar uma pequena percentagem, é de grande importância, pois produz grande escoamento superficial.

A partir dos mapas de blocos foram obtidos, através da rotina “PREPARA” do modelo hidrológico MGB, os arquivos “CELL”, contendo as porcentagens dos blocos para cada célula, para cada mapa apresentado na Figura 18.

O modelo hidrológico MGB, originalmente utiliza apenas um arquivo “CELL” para cada simulação. Entretanto, este estudo visa a analisar a influência das mudanças de uso do solo no comportamento hidrológico da bacia do rio Piracicaba. Contudo, foi necessário alterar a programação do modelo hidrológico, a fim dele utilizar cada arquivo “CELL”, em função do tempo, ou seja, do ano de simulação.

O ideal seria obter mapas de uso e ocupação do solo para cada ano no período analisado, entretanto, isso não foi possível.

Foram gerados arquivos “CELL” para todos os outros anos do período de estudo, a partir dos já existentes, sejam eles, 1978, 1985, 1993, 1997 e 2003, referentes aos mapas de blocos. Para o período de 1972 a 1978, foi considerado que não houve alteração de tipos e uso do solo, portanto, todos os arquivos são iguais ao obtido para o ano de 1978, e, para o período de 2003 a 2008, todos os arquivos são iguais ao obtido para o ano de 2003. Para os outros anos, os arquivos foram gerados considerando as alterações numa taxa constante entre os arquivos existentes, da seguinte forma: 1978 a 1985, 1985 a 1993, 1993 a 1997, e 1997 a 2003. A Tabela 3.6 apresenta as porcentagens de cada bloco para cada ano, entre 1978 e 2003. Lembrando que essas porcentagens de blocos ainda estão divididas por célula nos arquivos “CELL”.

Tabela 3.6 – Blocos de tipos de solo e usos do solo da bacia do rio Piracicaba, considerados na modelagem hidrológica

Bloco	Fração da área da bacia (%)																									
	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003
1	0.75	0.81	0.86	0.92	0.97	1.03	1.08	1.14	1.14	1.15	1.15	1.16	1.16	1.16	1.17	1.17	1.14	1.12	1.09	1.06	1.07	1.07	1.08	1.08	1.09	1.09
2	13.78	14.14	14.50	14.86	15.21	15.57	15.93	16.29	16.44	16.59	16.73	16.88	17.03	17.18	17.32	17.47	17.30	17.12	16.95	16.77	16.99	17.22	17.44	17.66	17.89	18.11
3	13.91	14.56	15.20	15.85	16.50	17.15	17.79	18.44	18.45	18.46	18.47	18.48	18.48	18.49	18.50	18.51	18.18	17.86	17.53	17.20	17.26	17.32	17.39	17.45	17.51	17.57
4	36.54	36.05	35.57	35.08	34.60	34.11	33.63	33.14	32.80	32.46	32.12	31.78	31.44	31.10	30.76	30.42	29.66	28.89	28.13	27.36	27.17	26.97	26.78	26.58	26.39	26.19
5	21.50	21.29	21.07	20.86	20.64	20.43	20.21	20.00	19.77	19.55	19.32	19.09	18.86	18.64	18.41	18.18	17.72	17.26	16.79	16.33	16.05	15.77	15.49	15.20	14.92	14.64
6	5.91	5.56	5.21	4.86	4.50	4.15	3.80	3.45	3.58	3.72	3.85	3.99	4.12	4.25	4.39	4.52	5.33	6.13	6.94	7.74	7.81	7.88	7.95	8.02	8.09	8.16
7	4.68	4.40	4.13	3.85	3.58	3.30	3.03	2.75	2.85	2.94	3.04	3.14	3.23	3.33	3.42	3.52	4.10	4.68	5.25	5.83	6.01	6.18	6.36	6.54	6.71	6.89
8	1.52	1.71	1.89	2.08	2.26	2.45	2.63	2.82	3.01	3.19	3.38	3.57	3.75	3.94	4.12	4.31	4.67	5.03	5.38	5.74	5.72	5.70	5.69	5.67	5.65	5.63
9	1.40	1.48	1.56	1.64	1.73	1.81	1.89	1.97	1.96	1.96	1.95	1.94	1.93	1.93	1.92	1.91	1.93	1.94	1.96	1.97	1.93	1.89	1.85	1.80	1.76	1.72

3.6.3 Calibração manual dos parâmetros do modelo

Os parâmetros utilizados para a calibração do modelo foram: W_m , b , K_{BAS} , K_{INT} , K_{FLUX} , XL , CAP , W_C , R_W , C_S , C_I e C_B , além dos parâmetros considerados fixos, como os que controlam a evapotranspiração (albedo, IAF , z , e r_s). Todos estes parâmetros, exceto o C_B , foram baseados nos valores encontrados na bibliografia.

O parâmetro TK_B foi obtido analisando os períodos de recessão do hidrograma para cada sub-bacia. As equações a seguir mostram como foi obtido o valor de TK_B a partir dos dados observados.

$$TK_B = C_B \cdot 24 \quad (4)$$

$$C_B = \frac{ND}{\ln\left(\frac{Q_{FR}}{Q_{IR}}\right)} \quad (5)$$

em que C_B [dias] é o parâmetro de retardo do reservatório subterrâneo; ND é o número de dias do período de recessão do hidrograma; Q_{IR} é vazão no início da recessão e Q_{FR} é a vazão no final da recessão.

Os valores dos parâmetros foram escolhidos a fim de resultar num bom ajuste dos dados observados e calculados para todos os postos fluviométricos. As vazões geradas pelo modelo são comparadas às vazões observadas em locais com dados de 12 postos fluviométricos.

Para avaliação da qualidade de ajuste foi considerada a análise visual dos hidrogramas, verificando os valores das funções objetivo:

i) Coeficiente de Nash-Sutcliffe das vazões diárias (R^2)

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n (Q_{obs} - Q_{calc})^2}{\sum_{t=1}^n (Q_{obs} - \overline{Q_{obs}})^2} \quad (6)$$

ii) Coeficiente de Nash-Sutcliffe dos logaritmos das vazões diárias (Rlog)

$$R_{\log} = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n (\log Q_{obs} - \log Q_{calc})^2}{\sum_{t=1}^n (\log Q_{obs} - \overline{\log Q_{obs}})^2} \quad (7)$$

iii) Relação entre volumes medidos e calculados (ΔV)

$$\Delta V = \frac{\sum_{t=1}^n (Q_{calc}) - \sum_{t=1}^n (Q_{obs})}{\sum_{t=1}^n (Q_{obs})} \quad (8)$$

em que : t indica o intervalo de tempo; n é o número de intervalos de tempo; V é o volume; ΔV é erro relativo adimensional deste volume; Q_{calc} é a vazão calculada no posto; Q_{obs} é a vazão observada; e $\overline{Q_{obs}}$ é a média das vazões observadas.

O coeficiente de Nash (R^2) e o coeficiente de Nash dos logaritmos das vazões (Rlog) tem um valor máximo igual a 1, que corresponde a uma ajuste perfeito entre vazões calculadas e observadas. O R^2 é fortemente influenciado por erros nas vazões máximas, portanto, quando estão próximos de 1, o modelo está obtendo um bom ajuste para as cheias. O desempenho de um modelo é considerado adequado e bom se o valor de R^2 supera 0,75, e é considerado aceitável se o valor de R^2 fica entre 0,36 e 0,75 (GOTSCHALK; MOTOVILOV, 2000).

Além disso, o Rlog também tem uma grande influência de erros nas vazões máximas, mas é mais fortemente influenciado pelas vazões mínimas do que o R^2 . Portanto, valores de Rlog próximos de 1, significam que o modelo está simulando adequadamente os períodos de recessão do hidrograma e as estiagens.

O erro no volume não tem valor máximo nem mínimo, e também não é influenciado de forma diferenciada por períodos de cheias ou de estiagens. Logo, o valor de ΔV apenas expressa a diferença relativa entre a soma de todas as vazões, calculadas e observadas, sem considerar sua sequência temporal. Esta função objetivo é útil para observar se as perdas de água por evapotranspiração estão sendo corretamente calculadas.

Todos os parâmetros utilizados foram submetidos a uma análise de sensibilidade, para auxiliar na calibração do modelo hidrológico em possíveis aplicações futuras. A análise foi feita apenas para a sub-bacia de Pires, pois não sofre influência do Sistema Cantareira.

3.6.4 Calibração multi-objetivo

Foi realizada uma nova calibração para a bacia do rio Piracicaba, utilizando os valores dos parâmetros obtidos na calibração manual, para melhorar o desempenho do modelo e o ajuste com os dados observados. Utilizou-se o método de calibração multi-objetivo, baseado no algoritmo genético MOCOM-UA (YAPO et al., 1998).

A faixa em que foi permitido ao algoritmo variar os valores dos parâmetros é dada pela Tabela 3.7. Para avaliação da qualidade de ajuste também foi considerada a análise visual dos hidrogramas, verificando os valores das funções objetivo.

Tabela 3.7 – Faixa de valores em que se permitiu a variação dos parâmetros durante a calibração automática

Parâmetro	Limite mínimo	Limite máximo
B	0,5	2,0
K_{INT}	0,5	2,0
K_{BAS}	0,5	2,0
K_{FLUX}	0,5	2,0
R_W	0,5	2,0
C_S	0,5	2,0
C_I	0,5	2,0
Wm bloco 1	0,5	2,0
Wm bloco 2	0,5	2,0
Wm bloco 3	0,5	2,0
Wm bloco 4	0,5	2,0
Wm bloco 5	0,5	2,0
Wm bloco 6	0,5	2,0
Wm bloco 7	0,5	2,0
Wm bloco 8	0,5	2,0

3.6.5 Simulações do modelo hidrológico na bacia do rio Piracicaba

O “Modelo Hidrológico de Grandes Bacias” (MGB) foi ajustado à bacia do rio Piracicaba, para o período de 1972 a 2008, num total de 37 anos. As simulações foram realizadas em dois períodos, sendo o primeiro período entre 1972 a 1990, que consistiu a fase de calibração, e no segundo período entre 1991 a 2008 foi realizada a verificação da calibração. Este modelo foi desenvolvido no Instituto de Hidráulica, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), e está descrito em Collischonn e Tucci (2001).

Além disso, as simulações foram realizadas em duas situações: com a presença do Sistema Cantareira e sem a presença do Sistema Cantareira. Na simulação considerando a presença do Sistema Cantareira foram utilizados apenas os dados de vazões liberadas à jusante das represas de Jaguari-Jacareí e Cachoeira. Esses dados foram substituídos nas células 60 (localizada na sub-bacia de Buenópolis) e 151 (localizada na sub-bacia de Atibaia), respectivamente. Os dados da represa Atibainha não foram utilizados neste estudo, pois a retirada de água desta represa não está localizada dentro da área da bacia delimitada pelo modelo (Figura 19). Uma simulação prévia foi feita para verificar a influência do Sistema Cantareira, e foi constatado que apenas as represas Jaguari-Jacareí e Cachoeira afetaram no comportamento dos hidrogramas.

Figura 19 – Localização das represas do Sistema Cantareira na área da bacia delimitada pelo modelo hidrológico

3.7 Simulações de cenários alternativos na bacia do rio Piracicaba

Considerando que a simulação realizada na bacia do rio Piracicaba no cenário atual foi satisfatória, e considerando que os valores dos parâmetros estão bem representados, foram realizadas simulações de situações hipotéticas de mudanças de uso do solo, para o período de 37 anos, 1972 a 2008. As situações hipotéticas estão descritas na Tabela 3.8.

Os resultados dessas simulações foram avaliados para a sub-bacia (12) que representa uma área de 10.909 Km², posto de Artemis, em termos de vazão média, máxima e mínima.

Tabela 3.8 – Cenários alternativos simulados

Cenário	Descrição
1	100% Floresta
2	90% Floresta e 10% Pastagem
3	90% Floresta e 10% Agricultura
4	100% Pastagem
5	100% Agricultura
6	Substituição da agricultura por floresta
7	Substituição da agricultura por pastagem
8	Substituição da pastagem por agricultura
9	Substituição da pastagem por floresta

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Ajustes e simulações do modelo hidrológico à bacia do rio Piracicaba

As vazões calculadas pelo modelo foram comparadas às vazões observadas em 12 postos fluviométricos. Os resultados da aplicação do modelo hidrológico à bacia do rio Piracicaba estão apresentados em termos de valores das funções objetivo, gráficos dos hidrogramas de vazões diárias observadas e calculadas, e curva de permanência.

4.1.1 Calibração dos parâmetros e simulação do modelo hidrológico

Os dados observados na bacia do rio Piracicaba estendem-se de 1972 a 2008 e após uma análise nas séries históricas, selecionou-se o período de 1972 a 1990 para a calibração do modelo hidrológico MGB-IPH. O ano de 1972 foi utilizado para aquecimento do modelo, ou seja, para a atenuação dos efeitos das condições iniciais.

Primeiramente, os parâmetros foram calibrados manualmente, para cada sub-bacia, e estes estão associados aos blocos de uso do solo. Nos APÊNDICES C e D estão listados os valores obtidos para os parâmetros calibráveis (W_m , b , K_{BAS} , K_{INT} , K_{FLUX} , R_w , C_S , C_I e C_B) e dos parâmetros fixos (IAF, albedo, z e r_s). A determinação dos valores dos parâmetros foi baseada nos encontrados na literatura. Todos foram adotados na tentativa de se obter o melhor ajuste das funções objetivo e hidrogramas.

O parâmetro de capacidade de armazenamento máximo de água no solo (W_m) adotado para floresta foi de 500 mm no bloco 7 (floresta e reflorestamento) e de 200 a 230 mm no bloco 5 (pastagem sobre solo raso a profundo e drenagem imperfeita). Hodnett et al. (1996) determinaram o armazenamento de água no solo na Amazônia de aproximadamente 700 mm em locais com floresta e 400 mm para pastagem. Portanto, foi considerado que o W_m para os blocos de floresta é superior aos blocos de agricultura, que é superior aos blocos de pastagem, devido ao maior comprimento das raízes das árvores das florestas. Além disso, o W_m para os solos profundos e fortemente drenados foi superior aos solos rasos a profundos e drenagem imperfeita.

Para os parâmetros b , K_{BAS} , K_{INT} , K_{FLUX} foi adotado o mesmo critério, entretanto, não foi observada muita diferença entre os tipos de solo, com isso, o valor destes parâmetros variaram apenas em função do tipo de uso do solo. Outros autores, como Collischonn (2001) e Silva (2005) adotaram os mesmos critérios para esses parâmetros.

O parâmetro de retardo de escoamento superficial (K_{FLUX}) atingiu valores entre 90 e 180 mm/dia, tais valores foram mais altos que os encontrados para o K_{INT} (oscilou entre 25 e 100 mm/dia) e estes maiores que os encontrados para o K_{BAS} (oscilou entre 2 e 10 mm/dia). Esses valores estão coerentes, dado que se supõe intuitivamente que o escoamento superficial é mais rápido do que o sub-superficial, e este mais rápido que o subterrâneo. Em outras aplicações: o K_{BAS} apresentou-se entre 0,5 e 2 mm/dia, valores bem mais baixos (COLLISCHONN, 2001; SILVA, 2005); e o K_{INT} atingiu valores entre 3 e 7 mm/dia (COLLISCHONN, 2001).

Os parâmetros R_W , C_S , C_I foram adotados para cada sub-bacia, sempre na tentativa de melhoria das funções objetivo, sendo que seus valores se repetiram para quase todas as sub-bacias.

Os parâmetros fixos (IAF, albedo, z e r_s) adotados variaram em função dos tipos de uso do solo e as estações do ano (seca e úmida), portanto, esta calibração só foi conduzida após a calibração dos parâmetros calibráveis discutidos acima, pois não é feita para cada sub-bacia.

O índice de área foliar (IAF) da floresta/reflorestamento foi sempre considerado superior ao da agricultura e este superior ao da pastagem. Além disso, o IAF é superior nos meses de novembro/dezembro e janeiro/fevereiro.

O valor do albedo adotado para agricultura variou de 0,15 a 0,18 no período úmido e 0,20 a 0,22 no período seco; para pastagem variou de 0,15 a 0,14 e 0,15 a 0,17, nos períodos úmido e seco, respectivamente. Para a floresta/reflorestamento o albedo não teve variação ao longo do ano, e foi adotado o valor 0,13.

A altura das plantas (z) só apresentou variação ao longo do ano para a agricultura, de 0,50 a 1,50 no período úmido e de 1,50 a 1,80 no período seco. A resistência superficial (r_s) variou ao longo do ano para agricultura (70 a 75 no período úmido e 75 a 85 no período seco), e para pastagem (70 no período úmido e 80 a 85 no período seco).

Os resultados da calibração estão apresentados na Tabela 4.1, em que se tem um resumo dos valores das funções objetivo nos 12 postos fluviométricos, para o período de calibração, de 1972 a 1990.

O coeficiente de Nash (R2) obtido para todos os postos, variou entre 0,55 e 0,86, e o coeficiente Nash para logaritmos das vazões (Rlog), variou entre 0,45 e 0,84. Na maioria dos postos, ambos os coeficientes foram superiores a 0,70.

Tabela 4.1 - Valores das funções objetivo para o período de calibração (1973 a 1990)

Sub-bacias	Posto fluviométrico	Rio	Área (Km ²)	Calibração		
				R2	Rlog	ΔV (%)
1	Pires	Jaguari	958	0,73	0,79	3,0
2	Buenópolis	Jaguari	1.945	0,81	0,78	5,6
3	Amparo	Camanducaia	667	0,55	0,45	0,6
4	Fazenda Barra	Camanducaia	957	0,74	0,69	5,9
5	Usina Ester	Jaguari	3.367	0,76	0,78	3,3
6	Atibaia	Atibaia	1.134	0,57	0,54	1,2
7	Bairro da Ponte	Atibaia	1.948	0,68	0,65	0,9
8	Acima de Paulínia	Atibaia	2.731	0,72	0,74	1,6
9	Carioba	Piracicaba	7.228	0,67	0,53	27,2
10	Piracicaba	Piracicaba	8.882	0,76	0,73	1,6
11	Recreio	Corumbataí	1.563	0,72	0,76	0,1
12	Artemis	Piracicaba	10.909	0,86	0,84	7,7
13	Foz*	Piracicaba	12.474	0,79	0,75	19,3

*não representa um posto fluviométrico, é apenas o exutório da bacia

Collischonn e Tucci (2001) aplicaram o modelo hidrológico à bacia do rio Taquari (RS) obtendo um bom ajuste do modelo e as funções objetivo atingiram valores de 0,91 (R2), 0,86 (Rlog) e 1,24 (ΔV) na fase de calibração e na fase de verificação valores de 0,82 (R2), 0,84 (Rlog) e -1,01 (ΔV).

O posto fluviométrico de Artemis é o que se encontra mais à jusante na bacia, sendo assim representa a maior área de drenagem, que contribuiu para melhores resultados encontrados das funções objetivo na aplicação do modelo. A Figura 20 apresenta os hidrogramas de vazões diárias (observado e calculado) em Artemis de 1973 a 1990, e verifica-se entre 1973 até início de 1982, uma tendência de superestimar os dados de vazão diária. A partir de março de 1982, é notada visualmente uma melhoria no comportamento do hidrograma e isto se deve à inserção dos dados do Sistema Cantareira.

Figura 20 – Hidrogramas de vazões diárias (observado e calculado) do rio Piracicaba no posto fluviométrico de Artemis, de 1973 a 1990

Os hidrogramas de vazões diárias (observado e calculado) em Artemis, de 1990, podem ser visualizados com maior riqueza de detalhes na Figura 21, mostrando, de maneira geral, que o modelo reproduz bem o hidrograma.

A curva de permanência das vazões diárias calculada em Artemis mostra um ajuste razoável para o período analisado (Figura 22). O erro no cálculo da vazão com probabilidade de excedência de 90% (Q_{90}) é de aproximadamente 5%.

Os valores mais baixos das funções objetivo (R2 e Rlog) foram para os postos fluviométricos de Amparo (sub-bacia 3) e Atibaia (sub-bacia 6). Collischonn e Tucci (2001) também observaram valores mais baixos de R2 e Rlog para áreas de drenagem de bacias inferior a 1.000 Km².

Figura 21 – Hidrogramas de vazões diárias (observado e calculado) do rio Piracicaba no posto fluvimétrico de Artemis, de 1990

Figura 22 – Curvas de permanência de vazões diárias (observada e calculada) do rio Piracicaba no posto fluvimétrico de Artemis, no período de 1973 a 1990

O posto em Amparo representa uma área de drenagem muito pequena, o que dificulta a obtenção de bons resultados das funções objetivo, já que o modelo utilizado foi desenvolvido para representar bacias maiores, pois as bacias pequenas reagem mais rapidamente às chuvas. A Figura 23 apresenta os hidrogramas de vazões diárias (observado e calculado) do posto em Amparo de 1973 a 1978, em que há uma tendência de superestimar as vazões mínimas e subestimar as vazões máximas para o período mostrado. Na Figura 24 são apresentados os hidrogramas de vazões diárias (observado e calculado) do posto em Amparo de 1987, onde o comportamento do hidrograma calculado altera. Há uma tendência de subestimar as vazões mínimas, entretanto, o hidrograma está bem representado.

Figura 23 – Hidrogramas de vazões diárias (observado e calculado) do rio Camanducaia no posto fluiométrico de Amparo, de 1973 a 1978

Figura 24 – Hidrogramas de vazões diárias (observado e calculado) do rio Camanducaia no posto fluviométrico de Amparo, de 1987

Já o posto em Atibaia apresenta outra peculiaridade, pois nesta sub-bacia existe uma retirada de água para o Sistema Cantareira. Na Figura 25 estão apresentados os hidrogramas de vazões diárias (observado e calculado) do posto em Atibaia (sub-bacia 6), ao longo do ano de 1973 1990. No período de 1973 a 1982 há uma tendência de superestimar as vazões mínimas.

A partir de 1982 o hidrograma representa bem as vazões mínimas, porém tende a subestimar os picos de cheia. Isto pode ser visto na Figura 26, que apresenta os hidrogramas de vazões diárias (observado e calculado) em Atibaia, de 1990. Além disso, pode ser notada uma redução da vazão diária ao longo do tempo para esta sub-bacia.

Os volumes totais calculados pelo modelo foram superiores aos volumes observados em todos os postos fluviométricos. Os maiores valores atingidos foram em Artemis e Carioba, de 7,7% e 27,20%, respectivamente.

Figura 25 – Hidrogramas de vazões diárias (observado e calculado) do rio Atibaia no posto fluviométrico de Atibaia, de 1973 a 1990

Figura 26 – Hidrogramas de vazões diárias (observado e calculado) do rio Atibaia no posto fluviométrico de Atibaia, de 1990

4.1.2 Verificação da calibração do modelo hidrológico

A verificação da calibração do modelo hidrológico foi realizada para o período de janeiro de 1991 a dezembro de 2008. A Tabela 4.2 apresenta os valores das funções objetivo no período de verificação em todos os postos fluviométricos. Em quase todos os postos, o período de verificação apresentou melhores resultados do que na calibração, em relação ao coeficiente de Nash (R^2) e o coeficiente Nash para logaritmos das vazões (R_{log}), exceto nos postos de Buenópolis, acima de Paulínia e Recreio. O erro de volumes totais calculados aumentou bastante para todos os postos, exceto para o posto em Artemis.

O coeficiente de Nash (R^2) obtido para todos os postos, variou entre 0,63 e 0,88, e o coeficiente Nash para logaritmos das vazões (R_{log}), variou entre 0,60 e 0,89, e ambos os coeficientes obtiveram médias muito próximas, de 0,75 e 0,76, respectivamente.

Tabela 4.2 - Valores das funções objetivo no período de verificação (1991 a 2008)

Sub-bacias	Posto fluviométrico	Rio	Área (Km ²)	Verificação		
				R^2	R_{log}	$\Delta V(\%)$
1	Pires	Jaguari	958	0,82	0,80	-11,6
2	Buenópolis	Jaguari	1.945	0,73	0,60	-27,5
3	Amparo	Camanducaia	667	0,63	0,61	-18,5
4	Fazenda Barra	Camanducaia	957	0,72	0,81	-15,4
5	Usina Ester	Jaguari	3.367	0,76	0,84	-16,1
6	Atibaia	Atibaia	1.134	0,73	0,69	-15,5
7	Bairro da Ponte	Atibaia	1.948	0,74	0,75	-20,5
8	Acima de Paulínia	Atibaia	2.731	0,69	0,73	-21,7
9	Carioba	Piracicaba	7.228	0,75	0,77	-13,3
10	Piracicaba	Piracicaba	8.882	0,84	0,89	-13,4
11	Recreio	Corumbataí	1.563	0,67	0,71	-1,5
12	Artemis	Piracicaba	10.909	0,88	0,88	-1,7
13	Foz*	Piracicaba	12.474	0,64	0,82	10,7

*não representa um posto fluviométrico, é apenas o exutório da bacia

No posto fluviométrico do rio Piracicaba, em Artemis, o coeficiente de Nash (R^2) passou de 0,86, no período de calibração, para 0,88, no período de verificação. O coeficiente Nash para logaritmos das vazões (R_{log}) passou de 0,84, no período de calibração, para 0,88, no período de verificação. O erro de volume calculado teve uma

redução, passando de 7,7%, na calibração, para 1,7%, na verificação. As Figuras 27 e 28 apresentam os hidrogramas de vazões diárias (observado e calculado) em Artemis de 1991 a 2008, e de 2000 a 2008, respectivamente. Verifica-se um bom ajuste do modelo, apesar de uma leve tendência de subestimar os picos de cheia.

A maior queda no desempenho do modelo ocorreu para o posto em Buenópolis, subestimando as vazões, tanto no período úmido, como no período de estiagem. Na Figura 29, que apresenta os hidrogramas de vazões diárias (observado e calculado) em Buenópolis, de 1991 a 1998, isso pode ser facilmente notado.

A Figura 30 apresenta os hidrogramas de vazões diárias (observado e calculado) do posto em Atibaia, que representa uma das sub-bacias onde há uma retirada de água pelo Sistema Cantareira. Nota-se uma melhoria na qualidade do ajuste, entretanto, tende a subestimar os picos das cheias.

A curva de permanência das vazões diárias calculada do rio Piracicaba no posto Artemis mostra um bom ajuste (Figura 31). As vazões até 20% de probabilidade de excedência tendem a subestimar e a vazão de 95% probabilidade de excedência é estimada com um erro de 10%.

Figura 27 – Hidrogramas de vazões diárias (observado e calculado) do rio Piracicaba no posto fluiométrico de Artemis, de 1991 a 1999

Figura 28 – Hidrogramas de vazões diárias (observado e calculado) do rio Piracicaba no posto fluviométrico de Artemis, de 2000 a 2008

Figura 29 – Hidrogramas de vazões diárias (observado e calculado) do rio Jaguari no posto fluviométrico de Buenópolis, de 1991 a 1998

Figura 30 – Hidrogramas de vazões diárias (observado e calculado) do posto fluviométrico de Atibaia, de 2001 a 2004

Figura 31 – Curvas de permanência de vazões diárias (observada e calculada) do rio Piracicaba no posto fluviométrico de Artemis, de 1991 a 2008

4.1.3 Análise visual de hidrogramas no período de 1973 a 1997

As Figuras 32, 33 e 34 apresentam os hidrogramas de vazões diárias (observadas e calculadas) para o período entre 1973 a 1995, dos postos de Buenópolis (rio Jaguari), Bairro da Ponte (rio Atibaia) e Piracicaba (rio Piracicaba). Em todas as figuras podemos notar o efeito do El Niño ocorrido em 1982/1983, que ocasionou enchentes na região Sudeste. Com isso, percebemos o aumento das vazões diárias neste mesmo período.

Analisando a Figura 32, podemos notar uma tendência de queda nas vazões diárias observadas a partir de 1986.

Na Figura 33 também foi verificada uma queda nas vazões observadas em 1975 e, posteriormente, a partir de 1977. Entretanto, o modelo tende a superestimar as vazões diárias na fase de recessão dos hidrogramas, no período de 1973 a 1981, e posteriormente tende a subestimar as vazões diárias na fase de recessão dos hidrogramas, a partir de 1983.

Tais tendências coincidem com o período de implantação do Sistema Cantareira na sub-bacia do rio Jaguari, que iniciou em 1981, e na sub-bacia do rio Atibaia, em 1976. Além disso, Moraes et al. (1997) também verificaram tendências negativas nas vazões diárias observadas nestes mesmos postos (Jaguari e Atibaia) e no mesmo período pelo teste de Pettitt.

Para o posto Piracicaba (Figura 34), não foi verificada nenhuma tendência nas vazões diárias observadas. O hidrograma calculado apresenta um bom ajuste ao observado, exceto, no período de 1973 a 1982, em que o modelo tende a superestimar as vazões diárias no período de recessão. Para este mesmo posto, Moraes et al. (1997) também não detectou mudanças nas vazões quando aplicou o teste de Pettitt.

Figura 32- Hidrogramas de vazões diárias (observado e calculado) do posto fluviométrico de Buenópolis, do rio Jaguari, de 1973 a 1995

Figura 33 - Hidrogramas de vazões diárias (observado e calculado) do posto fluviométrico de Bairro da Ponte, do rio Atibaia, de 1973 a 1995

Figura 34 - Hidrogramas de vazões diárias (observado e calculado) do posto fluviométrico de Piracicaba, do rio Piracicaba, de 1973 a 1995

A Figura 35 apresenta os hidrogramas de vazões diárias (observadas e calculadas) para o período entre 1973 a 1997, do posto de Artemis (rio Piracicaba). O efeito do El Niño ocorrido em 1982/1983, também é verificado. Visualmente não foi notada nenhuma tendência nas vazões observadas. Entretanto, Mortatti et al. (2004) num estudo exploratório das séries anuais de vazão para o período entre 1944 e 1997, para o mesmo posto, verificaram pelo teste de Mann-Kendall uma tendência negativa para os últimos vinte anos, porém não estatisticamente significativa, e também não verificou uma ruptura na série histórica, confirmado pelo teste de Pettitt.

Para o posto de Artemis o hidrograma calculado está bem ajustado ao observado, entretanto também tende a superestimar as vazões diárias na fase de recessão, no período de 1973 a 1982, e posteriormente tende a subestimar as vazões diárias a partir de 1983.

Figura 35 - Hidrogramas de vazões diárias (observado e calculado) do posto fluviométrico de Artemis, do rio Piracicaba, de 1973 a 1995

4.1.4 Influência do Sistema Cantareira

Para avaliar a influência do Sistema Cantareira no comportamento hidrológico na bacia do rio Piracicaba, foi realizada a simulação do modelo hidrológico sem considerar o Sistema Cantareira na bacia do rio Piracicaba, utilizando os mesmos parâmetros obtidos na calibração (item 4.1.1).

Os resultados desta simulação foram comparados aos obtidos na calibração, em que foi considerado o Sistema Cantareira, nas sub-bacias 2 e 6, referentes aos postos fluviométricos de Buenópolis e Atibaia, respectivamente.

Na Tabela 4.3 é apresentado o resumo dos valores das funções objetivo nos 12 postos fluviométricos, para o período 1973 a 1990.

Os resultados mostram que as sub-bacias que não sofrem influência do Sistema Cantareira mantiveram os mesmos valores das funções objetivo, sejam elas, as sub-bacias 1, 3, 4 e 11.

Tabela 4.3 - Valores das funções objetivo para o período 1973 a 1990

Sub-bacias	Posto fluviométrico	Calibração			Simulação		
		R2	Rlog	$\Delta V(\%)$	R2	Rlog	$\Delta V(\%)$
1	Pires	0,73	0,79	3,0	0,73	0,79	3,0
2	Buenópolis	0,81	0,78	5,6	0,51	0,49	20,1
3	Amparo	0,55	0,45	0,6	0,55	0,45	0,6
4	Fazenda Barra	0,74	0,69	5,9	0,74	0,69	5,9
5	Usina Ester	0,76	0,78	3,3	0,70	0,74	11,7
6	Atibaia	0,57	0,54	1,2	0,38	0,27	5,5
7	Bairro da Ponte	0,68	0,65	0,9	0,64	0,55	3,5
8	Acima de Paulínia	0,72	0,74	1,6	0,72	0,69	3,8
9	Carioba	0,67	0,53	27,2	0,67	0,53	27,2
10	Piracicaba	0,76	0,73	1,6	0,73	0,70	5,7
11	Recreio	0,72	0,76	0,1	0,72	0,76	0,1
12	Artemis	0,86	0,84	7,7	0,83	0,81	11,2

As sub-bacias 2 e 6 obtiveram uma diminuição brusca dos coeficientes R2 e Rlog, e um aumento no balanço entre volumes calculados e observados. Isso demonstra que a retirada de água do Sistema Cantareira afeta fortemente o regime hidrológico da bacia do rio Piracicaba.

As outras sub-bacias (5, 7, 8, 9, 10 e 12) são afetadas indiretamente, no entanto, todas as funções objetivo apresentaram diminuição do R2 e Rlog e aumento do ΔV .

A Figura 36 apresenta os hidrogramas de vazões diárias (observado e calculado) em Buenópolis, de 1981 a 1990, para a simulação sem considerar o Sistema Cantareira e para calibração (onde é o Sistema Cantareira é considerado). Contudo, o modelo tende a estimar maiores vazões e, ainda, não representa bem o comportamento do hidrograma observado. Os hidrogramas da calibração representam bem os dados observados, apesar de subestimar os picos das cheias. O mesmo ocorreu na sub-bacia 6 (posto de Atibaia), apesar dos resultados desta não terem sido tão bons. A Figura 37 apresenta os hidrogramas de vazões diárias (observado e calculado), para o período entre 1976 a 1990 para a simulação sem considerar o Sistema Cantareira e para calibração.

Esses resultados mostram que a implantação do Sistema Cantareira provocou não apenas a redução da vazão na bacia do rio Piracicaba, como também alterou o comportamento hidrológico das vazões diárias.

(a)

(b)

Figura 36 – Hidrogramas de vazões diárias (observado e calculado) do rio Jaguarí no posto fluviométrico de Buenópolis, de 1981 a 1990: Simulação sem o Sistema Cantareira (a) e Calibração (b)

(a)

(b)

Figura 37 – Hidrogramas de vazões diárias (observado e calculado) do rio Atibaia no posto fluviométrico de Atibaia, de 1976 a 1990: Simulação sem o Sistema Cantareira; e Calibração (b)

4.1.5 Análises de sensibilidade dos parâmetros

A validação do modelo hidrológico é de extrema importância, por isso foi feita uma análise de sensibilidade dos parâmetros utilizados. O conhecimento da influência dos parâmetros auxilia na calibração do modelo em possíveis aplicações futuras.

Foi feita uma análise de sensibilidade da aplicação do modelo hidrológico à bacia do rio Piracicaba, tomando por base a calibração feita para o período de 1973 a 1990, para a sub-bacia 1, referente ao posto fluviométrico Pires, no rio Jaguari. Esta sub-bacia foi escolhida pelo fato de ter apresentado bons resultados na calibração e por não sofrer influência do Sistema Cantareira.

Cada parâmetro foi analisado separadamente. O valor do parâmetro analisado foi sendo alterado a partir do valor considerado na calibração, enquanto os outros parâmetros permaneceram fixos. A sensibilidade é medida através da variação do valor do coeficiente de Nash (R^2), o coeficiente de Nash para logaritmos ($R_{\log}$) e o erro entre volumes medidos e calculados (ΔV), dentro de uma faixa aceitável do valor do parâmetro.

Foram feitos gráficos da análise de sensibilidade individualmente para cada parâmetro para visualizar melhor o comportamento das funções objetivo e posteriormente fazer uma análise final qualitativa. Entretanto, serão apresentados apenas os gráficos dos parâmetros que representam maior importância, sejam eles, capacidade de armazenamento máximo de água no solo (W_m), parâmetro de forma da relação entre armazenamento e saturação (b), parâmetro de drenagem subterrânea (K_{BAS}), parâmetro de drenagem sub-superficial (K_{INT}), albedo e resistência superficial (r_s).

É importante ressaltar que, como a calibração foi realizada manualmente, o valor 100% nem sempre corresponde ao máximo ou mínimo das funções objetivo. A Tabela 4.4 apresenta um resumo de uma análise qualitativa dos gráficos.

Tabela 4.4 - Sensibilidade das funções objetivo aos parâmetros do modelo

Parâmetro	R²	R_{log}	ΔV
Wm	alta	média	alta
b	alta	média	média
K _{BAS}	média	média	alta
K _{INT}	média	média	alta
K _{FLUX}	média	média	média
R _W	baixa	baixa	baixa
C _S	média	baixa	baixa
C _I	média	média	baixa
XL	média	média	média
W _C	baixa	média	média
IAF	baixa	baixa	média
albedo	média	média	média
r _s	média	alta	alta
z	baixa	baixa	média

A capacidade de armazenamento de água no solo (Wm) é o parâmetro mais importante e tem forte influência nas vazões máximas e mínimas, e no balanço entre volumes medidos e calculados (COLISCHONN, 2001). Na análise de sensibilidade apresentou alta sensibilidade nas vazões máximas e no balanço entre volumes, e média sensibilidade nas vazões mínimas, com a variação do Wm. Na Figura 38(a) podemos observar que valores muito baixos de Wm influenciam nos picos de cheias. A Figura 38(b) apresenta o erro no volume e mostra forte variação com a mudança do Wm.

O parâmetro b mostrou que exerce influência nas vazões mínimas e no balanço de volumes, e mais fortemente nos picos de vazões. A Figura 39(a) apresenta a variação das funções objetivo R² e R_{log}, em que se observa que valores muito altos de b tendem a menores valores de R² e R_{log}. E o mesmo ocorreu com o erro no volume (Figura 39 b), quanto maior o valor de b, maior o erro no volume.

Figura 38 - Sensibilidade dos coeficientes de ajuste (R^2 e R_{log}) às variações do armazenamento máximo de água no solo W_m (a); e do erro no volume (ΔV) (b)

Figura 39 - Sensibilidade dos coeficientes de ajuste (R^2 e R_{log}) às variações do parâmetro b (a); e do erro no volume (ΔV) (b)

As Figuras 40 e 41, a seguir, apresentam as análises de sensibilidade para os parâmetros de drenagem K_{BAS} e K_{INT} , respectivamente. Ambos mostram forte sensibilidade no erro de volumes, em que, conforme o aumento dos mesmos há uma tendência de superestimar o balanço de volumes. De acordo com Collischonn (2001), o conjunto de parâmetros W_m , C_s , b , K_{BAS} , K_{INT} e C_i controlam as vazões mínimas e a recessão dos hidrogramas. Em relação às funções objetivo $R2$ e $Rlog$, com o aumento destes parâmetros tende a diminuir o valor destas funções, influenciando na simulação das vazões no período úmido e seco.

As variações nos parâmetros fixos, IAF (índice de área foliar), albedo, r_s (resistência superficial) e z (altura das plantas) mostraram uma sensibilidade expressiva no erro de volumes, e isto ocorre porque tais parâmetros afetam direto ou indiretamente na evapotranspiração.

Na Figura 42 encontram-se os gráficos da análise de sensibilidade do albedo. Notou-se que valores mais altos do albedo tendem a diminuir os valores das funções objetivo $R2$ e $Rlog$ e superestimar o erro no volume.

A resistência superficial foi analisada numa faixa menor de valores, para as funções objetivo $R2$ e $Rlog$ (Figura 43a). A função objetivo $Rlog$ é mais sensível à variação da resistência superficial (r_s) do que o $R2$, mas valores mais baixos da resistência superficial tendem a diminuir as duas funções. Em relação ao erro no volume, valores mais altos da resistência superficial tendem a aumentar o balanço de volumes observados e calculados (Figura 43b).

(a)

(b)

Figura 40 - Sensibilidade dos coeficientes de ajuste (R^2 e R_{log}) às variações do parâmetro K_{BAS} (a); e do erro no volume (ΔV) (b)

Figura 41 - Sensibilidade dos coeficientes de ajuste (R^2 e R_{log}) às variações do parâmetro K_{INT} (a); e do erro no volume (ΔV) (b)

Figura 42 - Sensibilidade dos coeficientes de ajuste (R^2 e R_{log}) às variações do parâmetro albedo (a); e do erro no volume (ΔV) (b)

Figura 43 - Sensibilidade dos coeficientes de ajuste (R^2 e R_{log}) às variações do parâmetro r_s (a); e do erro no volume (ΔV) (b)

4.1.6 Calibração multi-objetivo

A Tabela 4.5 apresenta os resultados da calibração automática do modelo em cada um dos postos fluviométricos, que mostra os valores das funções objetivo e mostra também para o período de verificação.

Todos os resultados desta calibração foram bons, principalmente em relação aos erros de volumes totais (ΔV), pois reduziram bastante. A sub-bacia 9 apresentou um alto erro de volumes calculados e observados, entretanto apresentou forte melhoria nas funções objetivo em relação aos resultados da calibração manual. Os melhores resultados das funções objetivo foram encontrados para o posto de Artemis.

O coeficiente de Nash (R^2) obtido para todos os postos na calibração automática, variou entre 0,59 e 0,88, e o coeficiente Nash para logaritmos das vazões (R_{log}), variou entre 0,48 e 0,87. Na fase de verificação, o R^2 variou de 0,62 a 0,89 e o R_{log} variou de 0,63 a 0,89.

Na fase de verificação os resultados apresentaram melhoria para alguns postos e para outros não. O erro de volumes totais (ΔV) aumentou muito para quase todas as sub-bacias. O erro no volume atingiu valores de -2,7% a -27,4%.

Tabela 4.5 - Valores das funções objetivo da calibração automática (no período 1973 a 1990) e da verificação da calibração (no período 1991 a 2008)

Sub-bacias	Posto fluviométrico	Calibração			Verificação		
		R^2	R_{log}	$\Delta V(\%)$	R^2	R_{log}	$\Delta V(\%)$
1	Pires	0,74	0,79	-1,2	0,80	0,76	-14,0
2	Buenópolis	0,85	0,81	3,2	0,75	0,63	-27,4
3	Amparo	0,59	0,48	1,6	0,62	0,69	-17,1
4	Fazenda Barra	0,76	0,71	2,7	0,68	0,83	-17,3
5	Usina Ester	0,79	0,80	1,5	0,77	0,86	-15,4
6	Atibaia	0,62	0,58	-3,4	0,71	0,71	-17,3
7	Bairro da Ponte	0,75	0,68	1,1	0,76	0,80	-18,1
8	Acima de Paulínia	0,80	0,77	0,3	0,72	0,76	-19,7
9	Carioba	0,73	0,60	22,3	0,77	0,79	-12,6
10	Piracicaba	0,79	0,76	-0,8	0,88	0,88	-13,2
11	Recreio	0,75	0,75	-1,5	0,69	0,69	-2,7
12	Artemis	0,88	0,87	4,9	0,89	0,88	-2,7

Silva (2005) utilizou o modelo hidrológico de grandes bacias (MGB) à bacia do rio São Francisco e determinou os parâmetros pela calibração automática multi-objetivo. Obteve um ajuste muito bom do modelo à bacia e as funções objetivo atingiram valores de 0,99 (R2 e Rlog) e -0,72 (ΔV) na fase de calibração e na fase de verificação valores de 0,99 (R2), 0,98 (Rlog) e -0,67 (ΔV).

A Figura 44 apresenta os hidrogramas de vazões diárias (observado e calculado) em Carioba, de 1973 a 1978. Observa-se que a calibração melhorou um pouco o ajuste entre as curvas (observada e calculada) para as vazões máximas, mas, para as vazões mínimas, a calibração ainda precisa ser revisada. A Figura 45 apresenta os hidrogramas de vazões diárias (observado e calculado) em Artemis, de 1986 a 1990, em que se observa um mau ajuste para as vazões mínimas e uma melhoria do ajuste para as vazões máximas.

Na Figura 46 podem-se conferir os hidrogramas de vazões diárias (observado e calculado) em Piracicaba, de 1991 a 1994 (fase de verificação), em que foi verificado um mau ajuste para as vazões mínimas e uma melhoria do ajuste para as vazões máximas, quando comparado à verificação da calibração manual.

Figura 44 – Hidrogramas de vazões diárias (observado e calculado) do posto fluviométrico de Carioba, de 1973 a 1978

Figura 45 – Hidrogramas de vazões diárias (observado e calculado) do posto fluviométrico de Artemis, de 1986 a 1990

Figura 46 - Hidrogramas de vazões diárias (observado e calculado) do posto fluviométrico de Piracicaba, de 1991 a 1994

4.2 Análises das mudanças de uso e cobertura do solo na bacia do rio Piracicaba

4.2.1 Mudanças de uso do solo na bacia do rio Piracicaba

De acordo com os mapas de uso e cobertura do solo na bacia do rio Piracicaba apresentados no item 3.5, a cobertura do solo predominante é a pastagem, seguida da agricultura e silvicultura/floresta. A Figura 47 apresenta a evolução da área ocupada pelas principais classes de uso do solo na bacia do rio Piracicaba.

Podemos perceber que a pastagem foi a única classe que teve uma redução, num total de 17% entre 1978 a 2003. O restante das classes apresentou aumento da área de ocupação, com exceção da água, sendo a agricultura a classe de maior evolução (8%), a silvicultura/floresta de 4% e a área urbana de 4%.

Na bacia do rio Piracicaba predomina a pastagem. Essa classe apresentou uma permanente redução de sua área ao longo do período analisado, já que no ano de 1978 apresentava um percentual de 58% da área total da bacia e em 2003 esse percentual reduziu para 41%. Essa redução pode estar relacionada com a expansão das áreas agrícolas e o reflorestamento.

A classe “área urbana” apresentou um crescimento constante entre 1978 e 1997, e pode estar relacionado com os processos de urbanização do espaço rural e o surgimento das indústrias.

Com relação à classe “agricultura” observa-se um maior aumento de sua área de 1978 a 1993. No período de 1993 a 1997 percebe-se uma retração da área. De acordo dados do IBGE, nesse período ocorreu uma redução da área plantada da cana-de-açúcar na bacia do rio Piracicaba (Figura 2, item 2.1.2).

A Tabela 4.6 apresenta um resumo das diferenças das áreas de uso do solo (%), entre 1978 e 2003, para cada sub-bacia da bacia do rio Piracicaba, a fim de verificar quais sub-bacias sofreram maiores mudanças no uso do solo. Esses dados foram extraídos dos mapas de uso e cobertura do solo de 1978 e 2003.

Figura 47 – Evolução da área ocupada pelas principais classes de uso e ocupação do solo na bacia do rio Piracicaba, de 1978 a 2003

Tabela 4.6 – Diferenças das áreas de uso do solo (%), entre 1978 e 2003, para cada sub-bacia da bacia do rio Piracicaba

Sub-bacias	Posto fluviométrico	Água	Área urbana	Agricultura	Pastagem	Silvicultura/Floresta
1	Pires	0	1	0	-25	24
2	Buenópolis	0	2	-8	-2	8
3	Amparo	0	0	-2	-9	11
4	Fazenda Barra	0	2	-4	-8	10
5	Usina Ester	0	3	14	-19	3
6	Atibaia	0	5	-1	-13	10
7	Bairro da Ponte	0	3	-5	-7	9
8	Acima de Paulínia	0	10	7	-24	7
9	Carioba	0	6	12	-17	-1
10	Piracicaba	0	13	6	-15	-4
11	Recreio	0	2	12	-7	-7
12	Artemis	0	5	0	-6	1
13	Foz	0	2	43	-42	-3

A área urbana teve maior expansão nas sub-bacias 8, 9 e 10, que abrangem as regiões de Campinas, Paulínia, Americana e Piracicaba, correspondendo aos municípios mais populosos da bacia do rio Piracicaba.

A agricultura teve uma redução na região mais ao leste da bacia, nas sub-bacias 2, 3, 4, 6 e 7. O aumento da agricultura foi verificado nas sub-bacias na região do centro da bacia até a parte mais a oeste da bacia do rio Piracicaba, sejam elas, 5, 8, 9, 10, 11 e 13. Todavia, na sub-bacia 13 ocorreu o maior aumento da área agrícola.

A área de pastagem teve redução em todas as sub-bacias. A sub-bacia 13 sofreu a maior redução da pastagem e esta área foi totalmente substituída pela agricultura.

Com relação à categoria silvicultura/floresta, notou-se uma redução nas sub-bacias em que houve a expansão agrícola, e no restante das sub-bacias teve aumento. O maior aumento foi verificado na sub-bacia 1, que abrange a área do estado de Minas Gerais.

4.2.2 Avaliação preliminar na bacia do rio Piracicaba considerando as principais mudanças de uso e cobertura do solo

A bacia foi avaliada em duas situações: considerando as principais mudanças de uso do solo que ocorreram na bacia do rio Piracicaba no período analisado, sejam elas: a redução da pastagem e aumento de áreas agrícolas em todas sub-bacia no período de 1978 a 1993; a redução da pastagem e o aumento de áreas reflorestadas nas sub-bacias 1 até 9 no período de 1985 a 1997; e, a redução da pastagem, aumento de áreas agrícolas, aumento do reflorestamento e urbanização em todas sub-bacia no período de 1972 a 2008. Os cenários estão descritos na Tabela 4.7. Na Tabela 4.8 estão apresentados os resultados das simulações dos cenários descritas, em termos de vazão média.

Embora o ajuste do modelo à bacia do rio Piracicaba tenha sido razoável, para avaliação das consequências das mudanças de uso e cobertura do solo os parâmetros obtidos na calibração manual foram considerados como confiáveis.

Tabela 4.7 – Cenários simulados

Cenário	Sub-bacia	Área (Km ²)	Período	Descrição: Situação simulada
1	9	7.228	1985 a	Atual: Redução de pastagem e aumento de áreas reflorestadas
2			1997	Nenhuma mudança de uso do solo a partir de 1985
3	12	10.909	1978 a	Atual: Redução de pastagem e aumento de áreas agrícolas
4			1993	Nenhuma mudança de uso do solo a partir de 1978
5	12	10.909	1972 a	Atual: Redução de pastagem, aumento de áreas agrícolas, aumento de áreas reflorestadas e urbanização
6			2008	Nenhuma mudança de uso do solo a partir de 1972

Tabela 4.8 – Vazão média, lâmina escoada e diferença de escoamento anual em relação à situação hipotética, em que a bacia não sofre nenhuma mudança de uso do solo

Cenário	Sub-bacia	Período	Q _{MÁXIMA} (m ³ /s)	Q _{MÍNIMA} (m ³ /s)	Q _{MÉDIA} (m ³ /s)	Q _{MÉDIA} (mm/ano)	ΔQ (mm/ano)
1	9	1985 a	94,3	51,3	74,2	323,7	0,7
2		1997	94,4	51,4	74,0	323,0	
3	12	1978 a	308,4	95,2	138,0	399,0	- 2,3
4		1993	310,4	96,6	138,8	401,3	
5	12	1972 a	308,4	86,4	136,6	395,0	-5,5
6		2008	310,9	88,5	138,5	400,5	

Conforme os resultados apresentados na Tabela 4.8, houve um incremento da vazão média de 0,7 mm/ano diante as mudanças de uso de solo na bacia de 1985 a 1997, para a simulação que vai até a sub-bacia 9. Este resultado está coerente com Hibbert (1967), em que a redução da cobertura florestal aumenta a vazão média.

Na simulação para a bacia toda, ou seja, que vai até a sub-bacia 12, houve uma redução da vazão média de 2,3 mm/ano diante as mudanças de uso de solo na bacia de 1978 a 1993. Este resultado pode estar relacionado com a capacidade de armazenamento de água no solo (Wm), pois culturas agrícolas têm maior interceptação de água do que a pastagem, diminuindo o escoamento. Além disso, o aumento de áreas agrícolas requer uma maior quantidade de água para irrigação, afetando na vazão do rio.

Na simulação do cenário 6, em que foi considerado que a bacia não sofreu nenhuma transformação no uso e cobertura do solo, todas as vazões (máximas, mínimas e médias) foram superiores em relação as vazões para a condição do cenário 5, que representa a condição atual da bacia. Este resultado demonstra, que as mudanças de uso e cobertura do solo ocorridas na bacia do rio Piracicaba no período entre 1972 e 2008, ocasionaram uma redução das vazões: máxima de 2,5 m³/s; mínima de 2,1 m³/s; e, média de 1,9 m³/s, e uma redução no escoamento média anual de 5,5 mm.

4.3 Cenários alternativos de mudanças de uso do solo

Os resultados das vazões da bacia do rio Piracicaba para as situações hipotéticas de mudanças de uso do solo, para o período de 37 anos, 1972 a 2008 estão apresentadas na Tabela 4.9.

Tabela 4.9 – Vazão máxima, mínima e média, lâmina escoada e diferença de escoamento anual em relação à situação atual, obtida para o período entre 1972 a 2008 para a sub-bacia de Artemis, que abrange uma área de 10.909 Km²

Cenário	Descrição	Q _{MÁX}	Q _{MÍN} m ³ /s	Q _{MÉD}	Q _{MÉD} mm/ano	ΔQ
	ATUAL	308,4	86,4	136,6	395,0	-
1	100% floresta	319,4	96,6	149,3	431,6	36,6
2	90% floresta e 10% pastagem	318,0	95,5	147,9	427,4	32,4
3	90% floresta e 10% agricultura	320,8	96,8	149,7	432,7	37,7
4	100% pastagem	306,3	85,5	134,5	388,9	-6,1
5	100% agricultura	335,1	99,3	153,8	444,7	49,7
6	Conversão da agricultura para floresta	303,3	86,2	135,5	391,7	-3,3
7	Conversão da agricultura para pastagem	303,0	83,4	132,7	383,6	-11,5
8	Conversão da pastagem para agricultura	326,9	86,3	145,3	420,0	25,0
9	Conversão da pastagem para floresta	320,2	94,7	147,2	425,5	30,5

No cenário atual da bacia do rio Piracicaba a vazão média calculada é de 136,6 m³/s, onde a bacia tem 10.909 Km², que corresponde a 395 mm de escoamento anual. A vazão máxima corresponde a 308,4 m³/s, e a vazão mínima 86,4 m³/s.

Conforme os resultados apresentados na Tabela 4.9, houve um aumento das vazões média, máxima e mínima para os cenários alternativos que considera 100% floresta (cenário 2) e 100% agricultura (cenário 5) na bacia do rio Piracicaba, em relação ao cenário atual. Para a situação de 100% Pastagem (cenário 4), ocorreu o inverso, ou seja, as vazões reduziram.

Considerando todos os cenários, a situação de 100% agricultura, foi onde ocorreu o maior aumento da vazão em relação à situação atual. A vazão média teve um aumento de $17,2 \text{ m}^3/\text{s}$, que corresponde a $49,7 \text{ mm}$ de incremento no escoamento anual. Este aumento era esperado, pois de acordo com Tucci (2005) o plantio de culturas anuais na superfície do solo tende a aumentar a erosão e o escoamento, provocando impactos de alta intensidade, pois prevê a preparação do solo antes do período chuvoso, em que ocorre perda de solo, aumento do escoamento superficial, diminuição da infiltração, produção de sedimentos, entre outros.

A vazão média para a situação de 100% floresta foi de $149,3 \text{ m}^3/\text{s}$. Com um incremento de 10% de pastagem (cenário 2) causou redução da vazão máxima de $1,4 \text{ m}^3/\text{s}$, na vazão mínima de $1,1 \text{ m}^3/\text{s}$, e na vazão média de $1,4 \text{ m}^3/\text{s}$, que corresponde a uma diminuição do escoamento médio de $4,2 \text{ mm/ano}$. Este resultado não está coerente com os dados encontrados por Bosch e Hewlett (1982), que estimaram entre 10 a 25 mm o incremento médio para cada 10% de redução de área coberta por florestas decíduas de pequeno porte, porém estes resultados foram medidos em pequenas bacias. Collischonn (2001) estimou em 9 mm o incremento médio do escoamento, para o incremento de 10% de pastagem, para uma bacia cuja a área é 26.900 Km^2 , apresenta alta declividade e o tipo de solo na bacia favorece a geração rápida de grande cheias. Entretanto, Bosch e Hewlett (1982) também concluíram que não é possível detectar influência na vazão média quando o desmatamento é menor que 20%.

Quando foi simulado o incremento de 10% de agricultura (cenário 3), ocorreu um pequeno aumento nas vazões, sendo na vazão máxima $1,4 \text{ m}^3/\text{s}$, na vazão mínima $0,2 \text{ m}^3/\text{s}$ e na vazão média $0,4 \text{ m}^3/\text{s}$, respectivamente, que corresponde a um incremento médio anual no escoamento de $1,1 \text{ mm}$. Transformando a bacia de 100% floresta para 100% agricultura, houve um aumento das vazões máxima, mínima e média. O aumento

da vazão média foi de $4,5 \text{ m}^3/\text{s}$, que representa um aumento de aproximadamente de 3,0%. Este resultado está coerente com o encontrado por Collischonn (2001), que estimou um aumento de 14,4%.

Foi observado que a transformação da bacia para 100% pastagem (cenário 4) causou redução das vazões máxima, mínima e média. Em relação ao cenário atual, houve uma redução de $2,1 \text{ m}^3/\text{s}$ da vazão média, e em relação a 100% floresta, a redução foi de $14,8 \text{ m}^3/\text{s}$, que correspondem a redução de 1,5% e 9,9%, respectivamente. Estes resultados foram contrários ao encontrado por Collischonn (2001), que estimou um aumento da vazão média na ordem de 13,2%, transformando a bacia de floresta para pastagem.

Outros autores, como Hibbert (1967), Bruijnzeel (1990), Trancoso et al. (2007) também observaram um aumento da vazão média na bacia com a retirada da floresta natural. Entretanto, para este estudo isso não foi observado.

Outras simulações foram feitas, considerando que ocorreu a conversão da agricultura e da pastagem, que representam os dois principais tipos de uso e ocupação do solo na bacia de estudo.

Nos cenários 6 e 7, em que a agricultura foi substituída por floresta e pastagem, respectivamente, ocorreu redução das vazões máximas, mínimas e médias, em relação ao cenário atual em ambas as situações. Para os cenários 8 e 9 em que a pastagem foi substituída por agricultura e floresta, respectivamente, foi verificado um aumento das vazões.

Verifica-se que aumento e a redução da vazão média não ocorrem na mesma proporção nos cenários (6 a 9) apresentados pois as áreas de pastagem, agricultura floresta são bem diferentes. A pastagem apresenta a maior área, portanto, apresenta as maiores alterações na vazão quando é modificada.

Na conversão da agricultura por floresta (cenário 6) a redução na vazão média foi de $1,1 \text{ m}^3/\text{s}$. Esta redução era esperada, considerando que a capacidade de armazenamento de água no solo (W_m) para floresta é maior e o aumento da cobertura florestal proporciona aumento da evapotranspiração na bacia.

Em relação à conversão da agricultura para pastagem (cenário 7) a redução na vazão média foi de $3,9 \text{ m}^3/\text{s}$, e na conversão da pastagem para agricultura (cenário 8)

houve um aumento da vazão média de $8,3 \text{ m}^3/\text{s}$. Apesar da capacidade de armazenamento de água no solo (W_m) e a evapotranspiração para pastagem serem menor do que para agricultura, a redução da agricultura também pode diminuir o impacto no escoamento ocasionado pela preparação e manejo do solo. Portanto, estes resultados estão coerentes e de acordo com Tucci (2005).

O maior aumento da vazão média em relação ao cenário atual foi quando houve a conversão da pastagem para floresta (cenário 9), um aumento de $10,6 \text{ m}^3/\text{s}$, que corresponde a um incremento médio anual de 30,5 mm. Este aumento da vazão média contradiz ao esperado, pois de acordo com Tucci (2005) na condição de reflorestamento da bacia, ocorreria a uma redução do escoamento médio e da capacidade erosiva.

Dentre os cenários testados foi observado: o aumento da agricultura na bacia levou a um aumento da vazão média; e, o aumento da pastagem na bacia uma redução da vazão média, porém, menos expressivo. Os cenários 5 (100% agricultura) e 3 (90% florestas e 10% agricultura) apresentaram o maiores valores de vazão média, representando um aumento de 17,2 e $13,1 \text{ m}^3/\text{s}$, respectivamente, em relação ao cenário atual. Os cenários 7 (conversão da agricultura para pastagem) e 4 (100% pastagem) apresentaram redução da vazão média, de 3,9 e $2,1 \text{ m}^3/\text{s}$, respectivamente.

5 CONCLUSÕES

O Modelo Hidrológico de Grandes Bacias (MGB) ajusta-se bem à bacia do rio Piracicaba para simulação das vazões diárias, tendo em vista o bom ajuste entre as vazões diárias observadas e calculadas, na fase de calibração e verificação, evidenciando que o modelo pode ser um importante instrumento no manejo dos recursos hídricos desta bacia.

Alguns parâmetros do modelo exercem forte influência nos resultados das simulações de vazões diárias. A capacidade de armazenamento de água no solo (W_m) e o parâmetro de forma da relação entre o armazenamento e saturação (b) influenciam nas vazões máximas e mínimas e no erro de volumes; e os parâmetros de drenagem subterrânea (K_{BAS}) e sub-superficial (K_{INT}), albedo e a resistência superficial (r_s) influenciam no erro de volumes.

O modelo utilizado é sensível às mudanças no uso e cobertura do solo, mostrando a ocorrência de redução das vazões máximas, mínimas e médias anuais.

Para um cenário totalmente de uso agrícola na bacia do rio Piracicaba há um maior aumento da vazão média anual, em relação ao cenário atual, enquanto em um cenário de conversão da agricultura para pastagem há uma maior redução da vazão média anual.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **A implementação da cobrança pelo uso de Recursos Hídricos e Agência de Água das Bacias dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí**. Brasília, 2007. 112 p.
- AGUIAR, L.J.G.; COSTA, J.M.N.; AGUIAR, R.G.; GOMES, V. Albedos em áreas de pastagem e de floresta no sudoeste da Amazônia. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 14., 2006, Florianópolis -SC. **Anais eletrônicos...** Disponível em: <<http://www.cbmet.com>> Acesso em: 10 out. 2010.
- ANDREASSIAN, V. Waters and forests: from historical controversy to scientific debate. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 291, p. 1-27, May 2004.
- ANGULO FILHO, R. **Variações de características de redes de drenagem em função das fotografias aéreas verticais obtidas em épocas diferentes**. 1981. 128 p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1981.
- BAHIA, V.G.; CURI, N.; CARMO, D.N. Fundamentos de erosão do solo. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v.16, n. 176, p. 25-31, 1992.
- BARELLA, W.; PETRERE JUNIOR, M.; SMITH, W.S.; MONTAG, L.F.A. As relações entre as matas ciliares, os rios e os peixes. In: RODRIGUES, R.R.; LEITÃO FILHO, H.F. **Matas ciliares: conservação e recuperação**. 2. ed. São Paulo: EDUSP, 2001. p. 187-207.
- BATHURST, J.C.; WICKS, J.M.; O'CONNEL, P.E. The SHE / SHESED basin scale water flow and sediment transport modelling system. In: SINGH, V.P. (Ed). **Computer models of watershed hydrology**. Highlands Ranch: Water Resources Publications, 1995. p. 563-594.
- BEVEN, K.J.; LAMB, R.; QUINN, P.; ROMANOWICZ, R.; FREER, J. TOPMODEL. In: SINGH, V.P. (Ed). **Computer models of watershed hydrology**. Highlands Ranch: Water Resources Publications, 1995. p. 627-668.
- BLOSCHL, G.; ARDOIN-BARDIN, S.; BONELL, M.; DORNINGER, M.; GOODRICH, M.; GUTKNECHT, D.; MATAMOROS, D.; MERZ, B.; SHAND, P.; SZOLGAY, J. At what scales do climate variability and land cover change impact on flooding and low flows? **Hydrological Processes**, Chichester, v. 21, p. 1241-1247, Mar. 2007.
- BOSCH, J.M.; HEWLETT, J.D. A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 55, p. 3-23, Feb. 1982.
- BRANDÃO, V.S.; CECÍLIO, R.A.; PRUSKI, F.F.; SILVA, D.D. **Infiltração de água no solo**. Viçosa: UFV, 2006. 120 p.

BRONSTERT, A.; KOLOKOTRONIS, V.; SCHWANDT, D.; STRAUB, H. Comparison and evaluation of regional climate scenarios for hydrological impact analysis: General scheme and application example. **International Journal of Climatology**, London, v. 27, p. 1579-1594. July 2007.

BRUIJNZEEL, L.A. Hydrological functions of tropical forests: not seeing the soil for the trees? **Agriculture Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 104, p. 185-228, 2004.

CALIJURI, M.C.; BUBEL, A.P.M. Conceituação de microbacias. In: LIMA, W.P.; ZAKIA, M.J.B. (Org.). **As florestas plantadas e a água: implementando o conceito da microbacia hidrográfica como unidade de planejamento**. São Carlos: RIMA, 2006. p. 45-59.

CANASAT. **Tabelas**. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/mapdsr/tabelas.jsp>>. Acesso em: 26 out. 2010.

CASSEL, D.K.; NIELSEN, D.R. Field capacity and available water capacity. In: PAGE, A.L. (Ed.). **Methods on soil analysis**. Madison: ASA; SSSA, 1986. pt. 2, p. 901-926. (Agronomy Monographs, 9).

CENTRO DE ANÁLISE E PLANEJAMENTO AMBIENTAL. **Dados da estação meteorológica de Rio Claro**. Disponível em: <<http://www.rc.unesp.br/igce/ceapla/>>. Acesso em: 17 nov. 2009.

CENTRO DE PREVISÃO DE TEMPO E ESTUDOS CLIMÁTICOS. **Dados de estações meteorológicas do estado de São Paulo: Cachoeira Paulista, SP**. Disponível em: <<http://www.cptec.inpe.br/>>. Acesso em: 28 abr. 2010.

CENTRO INTEGRADO DE INFORMAÇÕES AGROMETEOROLÓGICAS. **Dados de estações meteorológicas do estado de São Paulo**. Disponível em: <<http://www.ciiagro.sp.gov.br/ciiagroonline/>>. Acesso em: 26 mar. 2009.

CHRISTOFOLETTI, A. A morfologia de bacias de drenagem. **Notícias Geomorfológicas**, Campinas, v.18, n. 36, p. 130-132, 1978.

_____. **Análise de sistemas em geografia**. São Paulo: Hucitec, 1979. 106 p.

_____. **Geomorfologia fluvial**. São Paulo: Edgard Blucher, 1981. 189 p.

COLLISCHONN, W. **Simulação hidrológica de grandes bacias**. 2001. 270 p. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

COLLISCHONN, W.; TUCCI, C.E.M. Simulação hidrológica de grandes bacias. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 6, n. 1, p. 95-118, jan./mar. 2001.

COMPANHIA DE SANEAMENTO BÁSICO DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Dados de vazões diárias do Sistema Cantareira**. Disponível em: <<http://www.sabesp.com.br>>. Acesso em: 26 mar. 2010.

COOPERATIVA DE SERVIÇOS E PESQUISAS TECNOLÓGICAS E INDUSTRIAIS. **Relatório da situação dos recursos hídricos das bacias hidrográficas dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí - 2007**: relatório final. Piracicaba: CPTI, 2008. 201 p. (Relatório Técnico CPTI - 404/08).

CULF, A.D.; FISCH, G.; HODNETT, M.G. The albedo of Amazonian forest and ranch land. **Journal of Climate**, Boston, v. 8, p. 1544-1554, June 1995.

DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA. **Banco de dados hidrológicos**. Disponível em:<<http://www.daee.sp.gov.br/>>. Acesso em: 17 mar. 2009.

ESPINOZA, J.C.V.; GUYOT, J.L.; RONCHAIL, J.; COCHONNEAU, G.; FILIZOLA, N.; FRAIZY, P.; LABAT, D; OLIVEIRA, E.; ORDONEZ, J.J. VAUCHEL, P. Contrasting regional discharge evolutions in the Amazon basin (1974-2004). **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 375, p. 297-311, 2009.

FAUSTINO, J. **Planificacion y gestion de manejo de cuencas**. Turrialba: CATIE, 1996. 96 p.

FLORENZANO, T.G. **Imagens de satélites para estudos ambientais**. São Paulo: Oficina de Textos, 2002. 97 p.

FOWLER, H.J.; BLENKINSOP, S.; TEBALDI, C. Linking climate change modeling to impacts studies: recent advances in downscaling techniques for hydrological modeling. **International Journal of Climatology**, London, v. 27, p. 1547-1578, 2007.

FRANÇA, G.V. **Interpretação fotográfica de bacias e de redes de drenagem aplicada a solos da região de Piracicaba**. 1968. 151 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1968.

GALLO, Z. O Processo de industrialização e urbanização na Bacia do Rio Piracicaba (1970/2000). **Revista de Ciência & Tecnologia**, Piracicaba, v. 8, n. 17, p. 9-17, jun. 2001.

GIONGO, P.R.; MOURA, G.B.A.; SILVA, B.B.; ROCHA, H.R.; MEDEIROS, S.R.R.; NAZARENO, A.C. Albedo à superfície a partir de imagens Landsat 5 em áreas de cana-de-açúcar e cerrado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 14, n. 3, p. 279-287, 2010.

GOMES, H.F.B.; SILVA, B.B.; CAVALCANTI, E.P.; ROCHA, H.R. Balanço de radiação em diferentes biomas no estado de São Paulo mediante imagens Landsat. **Geociências**, São Paulo, v. 28, n. 2, p. 153-164, 2009.

GOTTSCHALK, L.; MOTOVILOV, Y. Macro-scale hydrological modelling - a scandinavian experience. In: International Symposium on: 'Can science and society save the water crisis in the 21st century - reports from the World', 2000, Tokyo.

Anais... Tokyo: Japan Society of Hydrology and Water Resources, 2000. p. 38-45.

GROPPO, J.D.; MORAES, J.M.; BEDUSCHI, C.E.; MARTINELLI, L.A. Análise de séries temporais de vazão e precipitação em algumas bacias do Estado de São Paulo com diferentes graus de intervenções antrópicas. **Geociências**, São Paulo, v. 24, n. 2, p. 181-193, 2005.

HIBBERT, A.R. Forest treatment effects on water yield. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON FORESTRY HYDROLOGY, 1967, Oxford. Oxford: Pergamon, 1967. p. 527-543.

HODNETT, M.G.; OYAMA, M.D.; TOMASELLA, J.; MARQUES FILHO, O. Comparisons of long term water storage behaviour under pasture and forest in three areas of Amazonia. In: GASH, H.C.; NOBRE, C.A.; ROBERTS, J.M.; VICTORIA, R.L. (Ed.). **Amazonian deforestation and climate**. Chichester: Wiley, 1996. p. 57-77.

HORTON, R.E. Erosional development of streams and their drainage basins, hydrophysical approach to quantitative morphology. **Bulletin of the geological society of America**, New York, v. 56, p. 273-370, Mar. 1945.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Sistema IBGE de recuperação automática – SIDRA**. Disponível em: <<http://www.sidra.ibge.gov.br/>>. Acesso em: 05 abr. 2010.

IRRIGART. Engenharia & Consultoria em Recursos Hídricos e Meio Ambiente Ltda. **Relatório da situação dos recursos hídricos das bacias hidrográficas dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiá - 2002/2003**. Piracicaba, 2004. Disponível em: <<http://www.comitepcj.sp.gov.br/comitespcj.htm>>. Acesso em: 20 fev. 2008.

JACINTHO, L.R.C. **Geoprocessamento e sensoriamento remoto como ferramentas a gestão ambiental de unidades de conservação: o caso da área de proteção ambiental (APA) do Capivari - Monos, São Paulo-SP**. 2003. 121 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Minerais e Hidrologia) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

LEITÃO, M.M.V.B.R.; SANTOS, J.M.; OLIVEIRA, G.M. Estimativas do albedo em três ecossistemas da floresta amazônica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 6, n. 2, p. 256-261, 2002.

LIANG, X.; LETTENMAIER, D. P.; WOOD, E. F.; BURGESS, S. J. A simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for general circulation models. **Journal of Geophysical Research**, Washington, v. 99, n. 7, p. 14415-14428. 1994.

LIMA, W.P. **Princípios de manejo de bacias hidrográficas**. Piracicaba: ESALQ, 1976. 143 p.

MACHADO, R.E.; VETTORAZZI, C.A.; XAVIER, A.C. Simulação de cenários alternativos de uso da terra em uma microbacia utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, p. 727-733, 2003.

MAPA de solos do estado de Minas Gerais. Belo Horizonte: Geominas, 1993. Escala: 1:1.000.000. Disponível em: <<http://www.geominas.mg.gov.br/>>. Acesso em: 02 maio 2009.

MAPA de uso e cobertura do solo da bacia do rio Piracicaba. In: **Projeto PIRACENA, 1978**. Disponível em: <<http://www.cena.usp.br/piracena/html/uso.htm>>. Acesso em: 16 out. 2008.

_____. In: **Projeto PIRACENA, 1985**. Disponível em: <<http://www.cena.usp.br/piracena/html/uso.htm>>. Acesso em: 16 out. 2008.

_____. In: **Projeto PIRACENA, 1993**. Disponível em: <<http://www.cena.usp.br/piracena/html/uso.htm>>. Acesso em: 16 out. 2008.

_____. In: **Projeto PIRACENA, 1997**. Disponível em: <<http://www.cena.usp.br/piracena/html/uso.htm>>. Acesso em: 16 out. 2008.

_____. Piracicaba: IRRIGART, 2004. Disponível em: <<http://www.comitepcj.sp.gov.br/>>. Acesso em: 08 set. 2009.

MAPA pedológico do estado de São Paulo. Campinas: IAC, 1999. Escala: 1:500.000. Disponível em: <<http://www.iac.sp.gov.br/>>. Acesso em: 31 mar. 2009.

MARTINI, L.C.P.; MATTOS, D.S.; BARBOSA, D.F.P.; RECH, A.I.B. Uso de sensoriamento remoto orbital para avaliação da distribuição espacial de clorofila na lagoa da conceição de Florianópolis, SC. **Revista de Engenharia Sanitária e Ambiental**, Campina Grande, v. 11, n. 4, p. 318-324, out./dez. 2006.

MARTINS, F.B.; ROCHA, J.S.M.; ROBAINA, A.D.; KURTZ, S.M.J.M.; KURTZ, F.C.; GARCIA, S.M.; SANTOS, A.H.O.; DILL, P.R.; NOAL, T.N. Zoneamento ambiental da sub-bacia hidrográfica do Arroio Cadena, Santa Maria (RS): estudo de caso. **Cerne**, Lavras, v. 11, n. 3, p. 315-322, jul./set. 2005.

MENDONÇA, J.C.; SOUSA, E.F.; FREITAS, R.M.; LOPES, P.M.O.; ANDRÉ, R.G.B.; SILVA, B.B. Avaliação de metodologias de estimativas do albedo da superfície terrestre a partir de imagens MODIS. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13., 2007, Florianópolis - SC. **Anais...** Florianópolis: INPE, 2007. p. 3469-3474.

MORTATTI, J.; BORTOLETTO JÚNIOR, M.J.; MILDE, L.C.E.; PROBST, J.L. Hidrologia dos Rios Tietê e Piracicaba: séries temporais de vazão e hidrogramas de cheia.

Revista Ciências & Tecnologia, Piracicaba, v. 12, n. 23, p. 55-67, jan./jun. 2003.

MORAES, J.M.; GENOVEZ, A.M.; MORTATTI, J.; BALLESTER, M.V.; KRUSCH, A.V.; MARTINELLI, L.A.; VICTORIA, R.L. Análise de intervenção das séries temporais de vazão dos principais rios da bacia do rio Piracicaba. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 2, n. 2, p. 65-79, jul./dez. 1997.

MOURA, M.A.L.; LYRA, R.F.F.; BENINCASA, M.; SOUZA, J.L.; NASCIMENTO FILHO, E.F. Variação do albedo em áreas de floresta e pastagem na Amazônia. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 7, n. 2, p. 163-168, dez. 1999.

NUNES, A. Recursos hídricos superficiais na bacia hidrográfica do rio Côa num contexto de importantes alterações ambientais e socioeconômicas. In: CONGRESSO IBÉRICO SOBRE GESTÃO E PLANEAMENTO DA ÁGUA, 5., 2006, Faro. **Actas...** Faro: FNCA, 2006. 1 CD-ROM.

OLIVEIRA, I.C. **Simulação de cenários de desmatamento na Amazônia**. 2006. 67 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Atmosféricas) - Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

ORTIZ, J.L.; FREITAS, M.C. Análise da transformação do uso da terra, vegetação e impactos ambientais por meio do sensoriamento remoto e geoprocessamento. **Geociências**, São Paulo, v. 24, n. 1, p. 77-89, 2005.

PELLEGRINO, G.Q.; MORAES, J.M.; GUANDIQUE, M.E.G.; BALLESTER, M. V.R.; VICTORIA, R.L.; MARTINELLI, L.A. Análise espaço-temporal de componentes hidroclimáticos na bacia do rio Piracicaba, SP. **Revista de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 9, n. 1, p. 125-135, 2001.

PEREIRA, A.R.; VILLA NOVA, N.A.; SEDIYAMA, G.C. **Evapotranspiração**. Piracicaba: FEALQ, 1997. 183 p.

PINTO, S.A.F.; GARCIA, G.J. Experiências de aplicação de geotecnologias e modelos na análise de bacias hidrográficas. **Revista do Departamento de Geografia**, São Paulo, v. 17, p. 30-37, 2005.

PISSARRA, T.C.; GALBIATTI, J.A.; BORGES, M.J.; ROSALEN, D.; IHA, D. Avaliação por fotointerpretação do uso/ocupação do solo e erosão acelerada em microbacias hidrográficas utilizando sistemas de informação geográfica. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12., 2005, Goiânia. **Anais...** Goiânia: INPE, 2005. p. 2331-2337.

PRUSKI, F.F.; BRANDÃO, V.S.; SILVA, D.D. **Escoamento superficial**. Viçosa: UFV, 2003. 88 p.

RAWLS, W.J.; AHUJA, L.R.; BRAKENSIEK, D.L.; SHIRMOHAMMADI, A. Infiltration and soil water movement. In: MAIDMENT, D. **Handbook of hydrology**. New York: McGraw-Hill, 1993. p. 1 -51.

RIBEIRO NETO, A.; SILVA, R.C.V.; COLLISCHONN, W.; TUCCI, C.E.M. Simulação na Bacia Amazônica com Dados Limitados: Rio Madeira. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 12, n. 3, p. 47-58, 2008.

RODRIGUEZ, D.A.; TOMASELLA, J; LINHARES, C. Is the forest conversion to pasture affecting the hydrological response of Amazonian catchments? Signals in the Ji-Paraná Basin. **Hydrological Processes**, Chichester, v. 24, n. 10, p. 1254-1269, May 2010.

ROSSATO, L. **Estimativa da capacidade de armazenamento de água no solo do Brasil**. 2001. 145 p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2001.

SANTANA, D.P. **Manejo integrado de bacias hidrográficas**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2003. 63 p. (Embrapa Milho e Sorgo. Documentos, 30).

SHUTTLEWORTH, W.J. Evaporation In: MAIDMENT, D.R. **Handbook of hydrology**. New York: McGraw-Hill, 1993. p. 1-53.

SHUTTLEWORTH, W.J.; GASH, J.H.C.; LLOYD, C.R.; MOORE, C.J.; ROBERTS, J. Observations of radiation exchange above and below Amazonian forest. **Quarterly Journal Royal Meteorological Society**, London, v. 110, p. 1163-1169, 1984.

SILVA, B.C. **Previsão hidroclimática de vazão para a bacia do rio São Francisco**. 2005. 220 p. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

STEINER, D. Time dimension for crop surveys from space. **Photogrammetric Engineering**, Falls Church, v. 36, n. 2, p. 187-194, 1970.

STRAHLER, N.A. Quantitative analysis of watershed geomorphology. **Transaction of the American Geophysical Union**, Washington, v. 38, n. 6, p. 913-920, 1957.

TOMASELLA, J.; HODNETT, M.G. Estimating soil water retention characteristics from limited data in Brazilian Amazonia. **Soil Science**, Philadelphia, v. 163, p. 190–202, Mar. 1998.

TOMASELLA, J.; HODNETT, M.G.; ROSSATO, L. Pedotransfer functions for the estimation of soil water retention in Brazilian soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 64, p. 327–338, Jan./Feb. 2000.

TONELLO, K.C. **Análise hidroambiental da bacia hidrográfica da cachoeira das Pombas, Guanhães, MG**. 2005. 69 p. Tese (Doutorado em Ciências Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2005.

TRANCOSO, R.; CARNEIRO FILHO, A.; TOMASELLA, J. Amazônia, desflorestamento e água. **Ciência Hoje**, Rio de Janeiro, v. 40, n. 239, p. 30-37, jul. 2007.

TROCH, P.A.; PANICONI, C.; MCLAUGHLIN, D. Catchment-scale hydrological modeling and data assimilation. **Advances in Water Resources**, Southampton, v. 26, p. 131-135, 2003

TUCCI, C.E.M. **Impactos da variabilidade climática e uso do solo sobre os recursos hídricos**: estudo preparado como contribuição da ANA (Agência Nacional de Águas) para a Câmara Temática sobre Recursos Hídricos do Fórum Brasileiro de Mudanças Climáticas. Brasília: ANA, 2002. 150 p.

_____. **Modelos hidrológicos**. Porto Alegre: UFRGS, 2005. 678 p.

_____. **Hidrologia**: ciência e aplicação. Porto Alegre: UFRGS, 2007. 943p.

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

_____. Environmental Issues in the la Plata basin. **Water Resources Development**, Dublin, v. 14, n. 2, p. 157-173, 1998.

UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR. **Dados e cotações**: estatísticas (2003 a 2008). Disponível em: < <http://www.unica.com.br/>>. Acesso em: 26 out. 2010.

VILLELA, S.M.; MATTOS, A. **Hidrologia aplicada**. São Paulo: McGrawHill do Brasil, 1975. 245 p.

XAVIER, A.C.; VETTORAZZI, C.A. Leaf area index of ground covers in a subtropical watershed. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 60, n. 3, p. 425-431, July/Sept. 2003

_____. Mapping leaf area index through spectral vegetation indices in a subtropical watershed. **International Journal of Remote Sensing**, London, v. 25, n. 9, p. 1661–1672, May 2004a.

_____. Monitoring leaf area index at watershed level through NDVI from LANDSAT-7/ETM+ DATA. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 61, n. 3, p. 243-252, May/June 2004b.

XAVIER, A.C.; SOARES, J.V.; ALMEIDA, A.C. Variação do índice de área foliar em clones de eucalipto ao longo de seu ciclo de crescimento. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 26, n. 4, p. 421-427, 2002

XUE, Y.Y.; ZENG, F.J.; SCHOSSLER, C.A. SSiB and its sensitivity to soil properties – A case study using HAPEX-Mobilhy data. **Global and Planetary Change**, Amsterdam, v. 13, p. 183–194. 1996.

WIGMOSTA M.S.; VAIL L.W. LETTENMAIER D.P. A distributed hydrology-vegetation model for complex terrain. **Water Resources Research**, Washington, v. 30, n. 6, p. 1665-1679. 1994.

WRIGHT, I.R.; NOBRE, C.A.; TOMASELLA, H.R.; DA ROCHA, H.R.; ROBERTS, J.M.; VERTAMATTI, E.; CULF, A.D.; ALVALÁ, R.C.S.; HODNETT, M.G.; UBARANA, V.N. Towards a GCM surface parameterization of Amazonia. In: GASH, J.H.C.; NOBRE, C.A.; ROBERTS, J.M.; VICTORIA, R.L. (Ed.). **Amazonian deforestation and climate**. Chichester: Wiley, 1996. p. 1-14.

APÊNDICES

Apêndice A – Identificação das falhas existentes (entre 1972 e 2008), nos dados de vazão para cada posto fluviométrico utilizado

Postos	1972	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
1																																					
2																																					
3																																					
4																																					
5																																					
6																																					
7																																					
8																																					
9																																					
10																																					
11																																					
12																																					

Apêndice B – Relação das estações pluviométricas

Nº	Prefixo	Município	Altitude(m)	Latitude	Longitude
1	C4-071	Descalvado	780	21°58'	47°42'
2	D2-021	São Jose dos Campos	730	22°55'	45°58'
3	D3-002	Campinas	690	22°56'	46°54'
4	D3-008	Moji Mirim	640	22°26'	46°58'
5	D3-009	Moji Mirim	590	22°31'	46°57'
6	D3-018	Vargem	940	22°54'	46°25'
7	D3-023	Amparo	660	22°43'	46°50'
8	D3-027	Monte Alegre do Sul	750	22°42'	46°40'
9	D3-031	Amparo	760	22°37'	46°51'
10	D3-035	Pedra Bela	1090	22°48'	46°27'
11	D3-036	Pinhalzinho	880	22°47'	46°36'
12	D3-042	Jaguariúna	570	22°40'	46°58'
13	D3-046	Morungaba	750	22°53'	46°47'
14	D3-052	Pedreira	590	22°45'	46°56'
15	D3-054	Joanópolis	920	22°56'	46°16'
16	D4-004	Americana	540	22°42'	47°17'
17	D4-011	Campinas	620	22°58'	47°05'
18	D4-012	Rio Claro	600	22°25'	47°33'
19	D4-014	Itirapina	790	22°14'	47°48'
20	D4-016	Rio Claro	600	22°20'	47°29'
21	D4-022	Laranjal Paulista	470	22°55'	47°54'
22	D4-027	Faz. Belmonte	720	22°18'	47°27'
23	D4-032	Santa Cruz da Conceição	620	22°07'	47°25'
24	D4-034	Araras	600	22°16'	47°19'
25	D4-035	Analândia	660	22°08'	47°40'
26	D4-036	Itirapina	610	22°18'	47°45'
27	D4-037	Itirapina	740	22°09'	47°48'
28	D4-043	Corumbataí	600	22°13'	47°37'
29	D4-044	Campinas	710	22°53'	47°05'
30	D4-046	Campinas	600	22°47'	47°02'
31	D4-047	Campinas	630	22°50'	47°04'
32	D4-052	Cosmópolis	560	22°40'	47°13'
33	D4-054	Charqueada	600	22°31'	47°47'
34	D4-056	Piracicaba	500	22°41'	47°42'
35	D4-059	Santa Gertrudes	620	22°29'	47°31'
36	D4-060	São Pedro	600	22°32'	47°55'
37	D4-061	Piracicaba	470	22°41'	47°46'
38	D4-068	Rio das Pedras	615	22°52'	47°37'
39	D4-069	Capivari	500	23°00'	47°30'
40	D4-071	Piracicaba	490	22°47'	47°58'
41	D4-079	Santa Barbara d'Oeste	600	22°49'	47°28'
42	D4-082	Holambra	600	22°38'	47°03'
43	D4-083	Monte Mor	610	22°56'	47°15'
44	D4-087	Santa Barbara d'Oeste	560	22°50'	47°26'
45	D4-088	Santa Barbara d'Oeste	540	22°45'	47°27'
46	D4-092	Capivari	570	22°53'	47°27'
47	D4-094	Conchal	580	22°20'	47°11'
48	D4-098	Brotas	660	22°22'	47°59'

49	D5-044	Anhembi	560	22°41'	48°07'
50	D5-062	Santa Maria da Serra	470	22°34'	48°09'
51	E3-015	Itatiba	780	23°01'	46°50'
52	E3-017	Vinhedo	700	23°02'	46°58'
53	E3-050	Aruja	760	23°23'	46°21'
54	E3-055	São Jose dos Campos	630	23°06'	46°02'
55	E3-074	Atibaia	770	23°09'	46°33'
56	E3-076	Piracaia	820	23°03'	46°21'
57	E3-099	Nazaré Paulista	790	23°11'	46°24'
58	E3-154	Jarinu	730	23°00'	46°43'
59	E3-225	Nazaré Paulista	870	23°16'	46°25'
60	E3-230	Atibaia	800	23°13'	46°40'
61	E3-242	Igarata	780	23°12'	46°09'

Apêndice C - Parâmetros calibráveis do modelo hidrológico MGB para a bacia do rio Piracicaba utilizados na calibração para o período de 1972 a 1990

Bacia 1

uso	Wm	b	Kbas	Kint	Kflux	XL	CAP	Wc
agric_baix	200.0	0.18	8.0	80.00	140.00	0.67	0.00	0.05
agric_medi	250.0	0.18	8.0	80.00	140.00	0.67	0.00	0.05
agric_alta	300.0	0.18	8.5	80.00	140.00	0.67	0.00	0.05
past_media	180.0	0.14	7.0	50.00	90.00	0.67	0.00	0.05
pasta_alta	230.0	0.14	7.5	50.00	90.00	0.67	0.00	0.05
flor_media	400.0	0.26	10.0	100.00	180.00	0.67	0.00	0.05
flor_alta	500.0	0.26	10.0	100.00	180.00	0.67	0.00	0.05
area_urb	150.0	0.10	2.0	30.00	100.00	0.67	0.00	0.05
agua	100.0	0.10	2.0	30.00	100.00	0.67	0.00	0.05
RW	6.0							
CS	60.0							
CI	1300.0							
CB	2518.6							
QB_M3/SKM2	0.0							

Bacia 2

uso	Wm	b	Kbas	Kint	Kflux	XL	CAP	Wc
agric_baix	200.0	0.18	8.0	80.00	140.00	0.67	0.00	0.05
agric_medi	250.0	0.18	8.0	80.00	140.00	0.67	0.00	0.05
agric_alta	300.0	0.18	8.5	80.00	140.00	0.67	0.00	0.05
past_media	180.0	0.14	1.2	40.00	130.00	0.67	0.00	0.05
pasta_alta	230.0	0.14	1.2	40.00	130.00	0.67	0.00	0.05
flor_media	400.0	0.26	10.0	100.00	180.00	0.67	0.00	0.05
flor_alta	500.0	0.26	10.0	100.00	180.00	0.67	0.00	0.05
area_urb	150.0	0.10	2.0	30.00	100.00	0.67	0.00	0.05
agua	100.0	0.10	2.0	30.00	100.00	0.67	0.00	0.05
RW	6.0							
CS	60.0							
CI	1300.0							
CB	2518.6							
QB_M3/SKM2	0.0							

Bacia 3

uso	Wm	b	Kbas	Kint	Kflux	XL	CAP	Wc
agric_baix	200.0	0.18	8.0	80.00	140.00	0.67	0.00	0.05
agric_medi	250.0	0.18	8.0	80.00	140.00	0.67	0.00	0.05
agric_alta	300.0	0.18	8.5	80.00	140.00	0.67	0.00	0.05
past_media	230.0	0.12	3.5	35.00	90.00	0.67	0.00	0.05
pasta_alta	280.0	0.12	4.0	40.00	90.00	0.67	0.00	0.05
flor_media	400.0	0.26	10.0	100.00	180.00	0.67	0.00	0.05
flor_alta	500.0	0.26	10.0	100.00	180.00	0.67	0.00	0.05
area_urb	150.0	0.10	2.0	30.00	100.00	0.67	0.00	0.05
agua	100.0	0.10	2.0	30.00	100.00	0.67	0.00	0.05
RW	40.0							
CS	60.0							
CI	1300.0							
CB	2871.1							
QB_M3/SKM2	0.0							

Bacia 4

uso	Wm	b	Kbas	Kint	Kflux	XL	CAP	Wc
agric_baix	200.0	0.18	8.0	80.00	140.00	0.67	0.00	0.05
agric_medi	250.0	0.18	8.0	80.00	140.00	0.67	0.00	0.05
agric_alta	300.0	0.18	8.5	80.00	140.00	0.67	0.00	0.05
past_media	180.0	0.14	2.0	25.00	100.00	0.67	0.00	0.05
pasta_alta	230.0	0.14	2.0	25.00	100.00	0.67	0.00	0.05
flor_media	400.0	0.26	10.0	100.00	180.00	0.67	0.00	0.05
flor_alta	500.0	0.26	10.0	100.00	180.00	0.67	0.00	0.05
area_urba	150.0	0.10	2.0	30.00	100.00	0.67	0.00	0.05
agua	100.0	0.10	2.0	30.00	100.00	0.67	0.00	0.05
RW	3.0							
CS	30.0							
CI	1200.0							
CB	2041.8							
QB_M3/SKM2	0.0							

Bacia 5

uso	Wm	b	Kbas	Kint	Kflux	XL	CAP	Wc
agric_baix	200.0	0.18	8.0	80.00	140.00	0.67	0.00	0.05
agric_medi	250.0	0.18	8.0	80.00	140.00	0.67	0.00	0.05
agric_alta	300.0	0.18	8.5	80.00	140.00	0.67	0.00	0.05
past_media	180.0	0.14	2.5	40.00	100.00	0.67	0.00	0.05
pasta_alta	230.0	0.14	2.5	40.00	100.00	0.67	0.00	0.05
flor_media	400.0	0.26	10.0	100.00	180.00	0.67	0.00	0.05
flor_alta	500.0	0.26	10.0	100.00	180.00	0.67	0.00	0.05
area_urba	150.0	0.10	2.0	30.00	100.00	0.67	0.00	0.05
agua	100.0	0.10	2.0	30.00	100.00	0.67	0.00	0.05
RW	3.0							
CS	60.0							
CI	1200.0							
CB	2370.3							
QB_M3/SKM2	0.0							

Bacia 6

uso	Wm	b	Kbas	Kint	Kflux	XL	CAP	Wc
agric_baix	200.0	0.18	3.0	50.00	140.00	0.67	0.00	0.05
agric_medi	250.0	0.18	3.0	50.00	140.00	0.67	0.00	0.05
agric_alta	300.0	0.18	3.0	50.00	140.00	0.67	0.00	0.05
past_media	180.0	0.13	2.5	40.00	120.00	0.67	0.00	0.05
pasta_alta	230.0	0.13	2.5	40.00	120.00	0.67	0.00	0.05
flor_media	400.0	0.22	4.0	50.00	160.00	0.67	0.00	0.05
flor_alta	500.0	0.22	4.0	50.00	160.00	0.67	0.00	0.05
area_urba	150.0	0.10	2.0	30.00	100.00	0.67	0.00	0.05
agua	100.0	0.10	2.0	30.00	100.00	0.67	0.00	0.05
RW	50.0							
CS	100.0							
CI	1300.0							
CB	2908.7							
QB_M3/SKM2	0.0							

Bacia 7

uso	Wm	b	Kbas	Kint	Kflux	XL	CAP	Wc
agric_baix	200.0	0.18	3.0	50.00	140.00	0.67	0.00	0.05
agric_medi	250.0	0.18	3.0	50.00	140.00	0.67	0.00	0.05
agric_alta	300.0	0.18	3.0	50.00	140.00	0.67	0.00	0.05
past_media	230.0	0.14	2.0	20.00	100.00	0.67	0.00	0.05
pasta_alta	280.0	0.14	2.0	20.00	100.00	0.67	0.00	0.05
flor_media	400.0	0.22	4.0	50.00	160.00	0.67	0.00	0.05
flor_alta	500.0	0.22	4.0	50.00	160.00	0.67	0.00	0.05
area_urba	150.0	0.10	2.0	30.00	100.00	0.67	0.00	0.05
agua	100.0	0.10	2.0	30.00	100.00	0.67	0.00	0.05
RW	3.0							
CS	60.0							
CI	1200.0							
CB	2561.5							
QB_M3/SKM2	0.0							

Bacia 8

uso	Wm	b	Kbas	Kint	Kflux	XL	CAP	Wc
agric_baix	200.0	0.18	3.0	50.00	140.00	0.67	0.00	0.05
agric_medi	250.0	0.18	3.0	50.00	140.00	0.67	0.00	0.05
agric_alta	300.0	0.18	3.0	50.00	140.00	0.67	0.00	0.05
past_media	250.0	0.14	2.3	20.00	100.00	0.67	0.00	0.05
pasta_alta	300.0	0.14	2.3	20.00	100.00	0.67	0.00	0.05
flor_media	400.0	0.22	4.0	50.00	160.00	0.67	0.00	0.05
flor_alta	500.0	0.22	4.0	50.00	160.00	0.67	0.00	0.05
area_urba	150.0	0.10	2.0	30.00	100.00	0.67	0.00	0.05
agua	100.0	0.10	2.0	30.00	100.00	0.67	0.00	0.05
RW	3.0							
CS	60.0							
CI	1200.0							
CB	2271.4							
QB_M3/SKM2	0.0							

Bacia 9

uso	Wm	b	Kbas	Kint	Kflux	XL	CAP	Wc
agric_baix	200.0	0.18	3.0	50.00	140.00	0.67	0.00	0.05
agric_medi	250.0	0.18	3.0	50.00	140.00	0.67	0.00	0.05
agric_alta	300.0	0.18	3.0	50.00	140.00	0.67	0.00	0.05
past_media	250.0	0.14	2.0	20.00	100.00	0.67	0.00	0.05
pasta_alta	300.0	0.14	2.0	20.00	100.00	0.67	0.00	0.05
flor_media	400.0	0.22	4.0	40.00	180.00	0.67	0.00	0.05
flor_alta	500.0	0.22	4.0	40.00	180.00	0.67	0.00	0.05
area_urba	150.0	0.10	2.0	30.00	100.00	0.67	0.00	0.05
agua	100.0	0.10	2.0	30.00	100.00	0.67	0.00	0.05
RW	3.0							
CS	60.0							
CI	1200.0							
CB	3405.8							
QB_M3/SKM2	0.0							

Bacia 10

uso	Wm	b	Kbas	Kint	Kflux	XL	CAP	Wc
agric_baix	200.0	0.18	8.0	80.00	140.00	0.67	0.00	0.05
agric_medi	250.0	0.18	8.0	80.00	140.00	0.67	0.00	0.05
agric_alta	300.0	0.18	8.5	80.00	140.00	0.67	0.00	0.05
past_media	180.0	0.14	7.0	50.00	90.00	0.67	0.00	0.05
pasta_alta	230.0	0.14	7.5	50.00	90.00	0.67	0.00	0.05
flor_media	400.0	0.26	10.0	100.00	180.00	0.67	0.00	0.05
flor_alta	500.0	0.26	10.0	100.00	180.00	0.67	0.00	0.05
area_urba	150.0	0.10	2.0	30.00	100.00	0.67	0.00	0.05
agua	100.0	0.10	2.0	30.00	100.00	0.67	0.00	0.05
RW	3.0							
CS	60.0							
CI	1200.0							
CB	2141.9							
QB_M3/SKM2	0.0							

Bacia 11

uso	Wm	b	Kbas	Kint	Kflux	XL	CAP	Wc
agric_baix	200.0	0.18	7.0	80.00	140.00	0.50	0.00	0.05
agric_medi	250.0	0.18	7.0	80.00	140.00	0.50	0.00	0.05
agric_alta	300.0	0.18	7.0	80.00	140.00	0.50	0.00	0.05
past_media	150.0	0.14	5.0	70.00	100.00	0.50	0.00	0.05
pasta_alta	200.0	0.14	5.0	70.00	100.00	0.50	0.00	0.05
flor_media	400.0	0.26	8.0	100.00	160.00	0.50	0.00	0.05
flor_alta	500.0	0.26	8.0	100.00	160.00	0.50	0.00	0.05
area_urba	150.0	0.10	2.0	30.00	100.00	0.50	0.00	0.05
agua	100.0	0.10	2.0	30.00	100.00	0.50	0.00	0.05
RW	4.8							
CS	60.0							
CI	700.0							
CB	2450.1							
QB_M3/SKM2	0.0							

Bacia 12

uso	Wm	b	Kbas	Kint	Kflux	XL	CAP	Wc
agric_baix	200.0	0.18	4.0	50.00	140.00	0.67	0.00	0.05
agric_medi	250.0	0.18	4.0	50.00	140.00	0.67	0.00	0.05
agric_alta	300.0	0.18	4.0	50.00	140.00	0.67	0.00	0.05
past_media	180.0	0.14	3.0	30.00	100.00	0.67	0.00	0.05
pasta_alta	230.0	0.14	3.0	30.00	100.00	0.67	0.00	0.05
flor_media	400.0	0.22	5.0	50.00	160.00	0.67	0.00	0.05
flor_alta	500.0	0.22	5.0	50.00	160.00	0.67	0.00	0.05
area_urba	150.0	0.10	2.0	30.00	100.00	0.67	0.00	0.05
agua	100.0	0.10	2.0	30.00	100.00	0.67	0.00	0.05
RW	3.0							
CS	60.0							
CI	1200.0							
CB	3021.9							
QB_M3/SKM2	0.0							

Apêndice D - Parâmetros fixos usados do modelo hidrológico MGB para a bacia do rio Piracicaba

albedo

[illegible]

IAF

índice de área foliar[illegible]

Z

altura das árvores

[illegible] r_s

resistência superficial

[illegible]