

ANÁLISE DA VAZÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PRETO COM O MODELO SWAT.

JoãoFelix de Luca Lino¹, Cláudia Weber Corseuil², Masato Kobiyama³, Simone Malutta⁴, Patrícia Kazue Uda⁵, Nadine Lory Bortolotto⁶ & Irani dos Santos⁷

RESUMO - O objetivo do estudo foi analisar a dinâmica hidrológica da bacia hidrográfica do Rio Preto (1000km²), localizada no norte de Santa Catarina, utilizando o modelo SWAT. No estudo foram aplicadas duas calibrações (manual e automática) para simular o escoamento superficial nos diferentes cenários de uso do solo. Para avaliar o desempenho do modelo, os dados diários de vazão simulados pelo modelo SWAT foram comparados com os observados na bacia usando o coeficiente de Nash e Sutcliffe e o desvio padrão. Foram escolhidos quatro cenários com o objetivo de verificar as mudanças de uso e cobertura do solo, e a influência dos reservatórios no escoamento superficial. Os cenários simulados foram: 1) uso e cobertura atual do solo; 2) mata nativa; 3) agricultura; e 4) uso e cobertura atual sem reservatórios. Como resultados observou-se que o cenário 3 apresentou maior escoamento superficial. O maior impacto na redução do escoamento superficial foi obtido pela substituição do cenário 1 pelo 2. A maior diferença entre os cenários nas simulações de escoamento superficial anual foi de 118,17 mm (variação de 57%) entre o 3 e o 2, para 1996.

ABSTRACT - The objective of the present study was to analyze the hydrological dynamics of the Preto River watershed (1000 km²), located in northern Santa Catarina by using the SWAT. The study applied two types of calibrations (manual and automatic) to simulate the runoff with different scenarios of the land-use. To evaluate the performance of the model, the daily discharge data simulated with the SWAT were compared with those observed in the watershed through the Nash and Sutcliffe coefficient and standard deviation. In order to verify the hydrological effects of the land-use change and of the dam-reservoir operation, four scenarios were chosen: 1) current land-use; 2) conversion to native forest; 3) agriculture, and 4) current land-use without reservoirs. The results showed that the scenario 3 showed the highest runoff. The greatest impact in reducing the runoff was obtained by replacement of scenario 1 by 2. The biggest difference between the scenarios in simulations of annual runoff was 118.17 mm (57%) between the scenarios 3 and 2 for 1996.

Palavras-chave: Modelagem hidrológica, escoamento superficial, SWAT.

1) Engenheiro Sanitarista e Ambiental, Msc, CASAN - Companhia Catarinense de Águas e Saneamento, Rua Quinze de Novembro, 230 - Balneário - Florianópolis/SC. E-mail: joaofelixdelucalino@gmail.com

2) Bolsista do CAPES, PNPD, Pós-Doutoranda do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina. Caixa postal 476, Florianópolis/SC, 88040-900. E-mail: cwcorseuil@ens.ufsc.br

3) Bolsista do CNPq, professor associado do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina. Caixa postal 476, Florianópolis/SC, 88040-900. E-mail: kobiyama@ens.ufsc.br

4) Bolsista do CNPq, acadêmica do Curso de Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina. Caixa Postal 476, Florianópolis/SC, 88040-900. E-mail: simonemalutta@gmail.com

5) Bolsista do CNPq, acadêmica do Curso de Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina. Caixa Postal 476, Florianópolis/SC, 88040-900. E-mail: pati_kz@yahoo.com.br

6) Bolsista de Monitoria, acadêmica do Curso de Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina. Caixa Postal 476, Florianópolis/SC, 88040-900. E-mail: nadi@ens.ufsc.br

7) Bolsista do CNPq, professor assistente do Departamento de Geografia da Universidade Federal do Paraná. Centro Politécnico da UFPR, Caixa Postal 19001, Curitiba/PR, 81531-990. E-mail: irani@ufpr.br

1 – INTRODUÇÃO

A dinâmica de sedimentos é regida pelo escoamento de água numa bacia hidrográfica, sendo este o principal agente responsável pelos processos de erosão do solo. Assim, a compreensão dos processos hidrológicos e do escoamento de água permite entender a dinâmica dos sedimentos numa bacia hidrográfica.

A intervenção humana em bacias rurais através de atividades agroflorestais em áreas com grande declividade e o desmatamento de encostas e margens de rios propicia a redução da infiltração de água no solo e, conseqüentemente, o aumento do fluxo superficial, desencadeando, muitas vezes, o fluxo torrencial sob fortes chuvas. Esses fatores favorecem o progresso dos processos de erosão, que desestabilizam as encostas e conferem maior carga de sedimentos ao fluxo de água nos rios. Isto compromete a qualidade e quantidade de água disponível para abastecimento e produção de insumos para a população.

A importância de se adotar a bacia hidrográfica como unidade de estudo e planejamento é devido ao fato desta ser uma unidade geográfica onde os recursos naturais se integram, constituindo uma área de fácil reconhecimento e caracterização. Desta forma, quando o problema central é água, a solução deve estar estreitamente ligada ao seu manejo e manutenção.

A conservação dos recursos hídricos está intimamente relacionada à qualidade das bacias hidrográficas, ou seja, à conservação de nascentes e matas ciliares, uso adequado do solo e cobertura vegetal. Esses fatores são regulamentados por leis para assegurar que as atividades antropogênicas alterem o mínimo possível a dinâmica e o ecossistema das bacias. Dessa maneira, há necessidade de se conhecer o potencial hídrico das bacias e os efeitos negativos que estas atividades acarretam ao ambiente.

Assim, o monitoramento hidrossedimentológico e meteorológico é indispensável para o desenvolvimento dos recursos hídricos dentro de bases sustentáveis, sendo o componente chave da proteção ambiental, e procura organizar uma série de atividades seqüenciais para produzir e transmitir informações sobre recursos hídricos (Braga et al, 2002; Markowitz et al., 2003).

Entender os processos naturais para conduzir esses problemas tem sido um contínuo desafio para cientistas e engenheiros. Modelos matemáticos simulam e simplificam complexos processos e são ferramentas úteis para analisar e compreender os problemas e encontrar soluções através de mudanças no uso do solo e melhores práticas de manejo. Modelos hidrológicos e de poluição não pontuais, também são ferramentas úteis na avaliação das condições ambientais de uma bacia hidrográfica e das boas práticas de manejo que pode auxiliar na redução dos efeitos negativos do escoamento superficial nos corpos hídricos. Também é importante o entendimento do modelo para

uso apropriado, evitando possíveis erros de uso. Os modelos devem ser testados em várias bacias antes de usá-los na tomada de decisão (Borah & Bera, 2004).

Para o estudo foi utilizado o modelo hidrológico SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*). Este é um modelo matemático que permite simular diferentes processos físicos na bacia hidrográfica (evapotranspiração, infiltração, escoamento superficial, subsuperficial e subterrâneo), com o objetivo de analisar os impactos das alterações no uso do solo sobre o escoamento superficial e subterrâneo, produção de sedimentos e qualidade de água, em bacias agrícolas não instrumentadas. Com o SWAT pode-se calcular hidrogramas, sedimentogramas e obter informações espaciais com possível simulação de cenários. O modelo também permite analisar o escoamento de água e a produção de sedimentos de forma espacial e distribuída na bacia (Neitsch et al., 2005).

A bacia hidrográfica do Rio Preto, localizada na região norte catarinense, abrange os municípios de Mafra e Rio Negrinho. Atualmente, a área da bacia possui uma paisagem bastante degradada, com diversos usos e ocupação do solo. A modelagem para entendimento dos processos hidrológicos na bacia em estudo é justificável, visto que na área de drenagem da bacia é realizada a captação de água no rio Corredeiras (afluente do Rio Preto) pelo Serviço Autônomo de Água e Esgoto de Rio Negrinho (SAMAE) bem como, estudos para sua ampliação. A montante dos dois reservatórios e perto da cabeceira da bacia existe uma área de preservação ambiental (APA).

Neste contexto, o presente trabalho tem por objetivo analisar o escoamento superficial na bacia hidrográfica do Rio Preto, por meio do modelo hidrológico SWAT, com cenários de uso atual do solo, mata nativa, agricultura e uso atual do solo sem reservatório.

2 - ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo é a bacia hidrográfica do Rio Preto, afluente do rio Negro, com uma área de 1000km², localizada no Planalto Norte Catarinense, entre as longitudes 46°10'W e 46°34'W e latitudes 26°10'S e 26°38'S (Figura 1). Esta bacia abrange três municípios catarinenses: Mafra, Rio Negrinho e Itaiópolis. Na bacia do Rio Preto encontram-se dois reservatórios pertencentes a uma empresa de reflorestamento.

O clima da bacia é do tipo Cfb, segundo Köppen, ou seja, clima temperado constantemente úmido, sem estação seca, com verão fresco (temperatura média do mês mais quente < 22,0°C). O clima é mesotérmico brando (temperatura do mês mais frio entre 10 e 15°C), com isoterma do mês mais frio entre 11,5°C e 13,0°C, ficando inserida, desta forma, na GUP 3 (EPAGRI/CIRAM, 2008; Braga, 2008). A temperatura média anual varia entre 15,5 a 17,0°C. A temperatura média das máximas varia de 26,6 a 24,0°C, e das mínimas de 10,8 a 11,8°C. A precipitação pluviométrica total anual pode variar de 1.360 a 1.670 mm, com o total anual de dias de chuva entre 138 e 164

dias. A umidade relativa do ar pode variar de 80,0 a 86,2% (EPAGRI/CIRAM, 2008). A bacia está inserida na Formação Rio Bonito, pertencente ao Grupo Guatá, e nas Formações Rio do Sul e Mafra, pertencentes ao Grupo Itararé. Ambos os grupos estão inseridos em substrato sedimentar pertencente ao Super Grupo Tubarão.

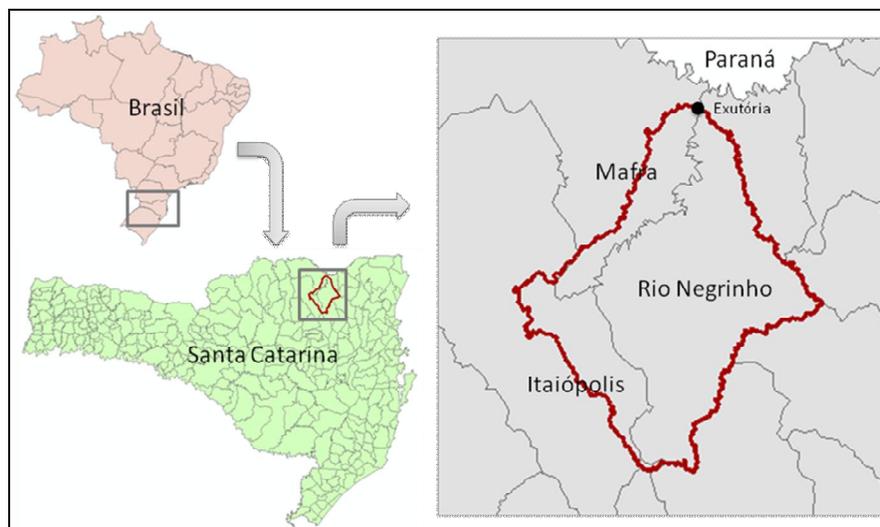


Figura 1 - Localização da bacia experimental do Rio Preto.

A bacia do Rio Preto está situada na região de predominância da floresta de araucária denominada por Klein (1978) como Floresta Ombrófila Mista que se caracteriza por apresentar como espécie dominante o pinheiro brasileiro (*Araucaria angustifolia*). Segundo Klein (1978) no estrato da submata predominam a imbuia (*Ocotea porosa*) e a Sapopema (*Sloanea lasiocoma*). Já na sinusita das árvores predomina a erva-mate (*Ilex paraguariensis*). Essas características imprimem um fâcies próprio à mata dos pinhais dessa região do Estado de Santa Catarina. A paisagem dessa região encontra-se bastante fragmentada, em função do plantio de *Pinus* sp, que é a unidade dominante da paisagem atual (matriz), apresentando poucos e pequenos fragmentos de Floresta Ombrófila Mista, alguns conectados a corredores ciliares remanescentes e outros isolados na paisagem. A cobertura vegetal da região está inserida na transição entre as unidades fitogeográficas da Floresta Ombrófila Mista (floresta com araucária) e Floresta Ombrófila Densa (floresta atlântica), ambas constituintes do bioma Mata Atlântica. A cobertura original da região foi descaracterizada pela ação antrópica que, desde a colonização, vinha sendo feita, principalmente, pela exploração das florestas para extração de madeiras, implantação de cultivos anuais e pelas pastagens, para a criação extensiva de gado bovino (Santa Catarina, 1986).

A Floresta Ombrófila Mista ocorre, geralmente, em altitudes superiores a 500 m, onde as chuvas são bem distribuídas ao longo do ano, sem períodos de seca e com temperatura média anual amena, com quatro a seis meses de frio (temperatura média de 15°C) e, com no máximo seis meses

quentes (temperatura média de 20°C). Na região, atualmente, a cobertura vegetal predominante é de floresta secundária em estágio avançado de regeneração, devido ao corte seletivo de araucária (*Araucaria angustifolia*), imbuia (*Ocotea porosa*) e cedro (*Cedrella fissilis*) e ao corte raso, que ocorreram nas décadas de 1960 e 1970. Nessa época a cobertura original foi substituída por cultivos anuais, pastagens e para implantação de florestas plantadas com espécies exóticas, como o pinus (*Pinus taeda*). Hoje, a economia da região é movida pelo reflorestamento de pinus que abastece principalmente a indústria moveleira (Prefeitura Municipal de Rio Negrinho, 2008).

A bacia do Rio Preto possui quatro tipos de solos: Cambissolo Háplico alumínico (CXa), Nitossolo Bruno alumínico (NBa), Latossolo Bruno alumínico (LBa) e Neossolo Litólico distrófico (RLd) (EMBRAPA, 2004). Na bacia os solos predominantes são os CXa (85,83%), seguido pelo NBa (12,02%), os LBa (1,66%) e os RLd (0,04%) (Figura 2).

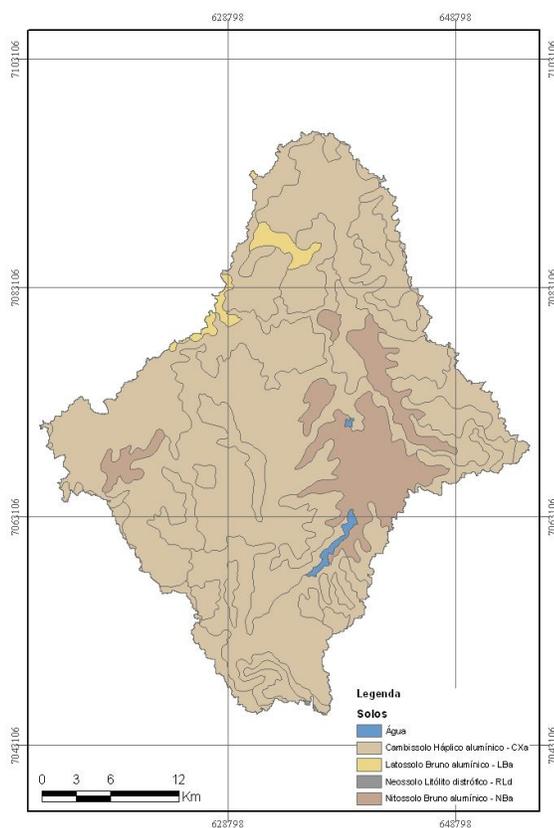


Figura 2 - Classes de solos da bacia do Rio Preto-SC (EPAGRI/CIRAM, 2004).

3 – MATERIAIS E MÉTODOS

Neste estudo foram utilizados mapas topográficos, em formato vetorial, disponibilizados pela EPAGRI/CIRAM (2008), na escala 1:50.000, projeção UTM, datum vertical de Imbituba-SC e horizontal SAD-69, fuso 22S. Esses mapas foram utilizados para determinar a rede de drenagem, delimitar a bacia e gerar o modelo digital de elevação (MDE). Os tipos de solos da bacia foram

obtidos do mapa de solos de Santa Catarina, em escala de 1:250.000 elaborado pela EMBRAPA/EPAGRI (2004). Para a determinação do uso e cobertura do solo foram utilizadas três cenas do satélite LANDSAT-TM5 referentes às órbitas/pontos 220/79, 220/78 e 221/78, com datas de julho de 2007.

Para o estudo foram utilizados o ArcGIS 9.1, desenvolvidos pela *Environmental Systems Research Institute (ESRI), Redlands, California, EUA* e o ArcSWAT (*Soil and Water Assessment Tool*) v. 1.0.6, desenvolvido pelo *Blackland Research Center Texas Agricultural Experiment Station e USDA Agricultural Research Service*.

O modelo SWAT requer dois tipos de dados: tabulares e espaciais. Os dados tabulares são dados meteorológicos para o gerador climático e de vazão observado para simulação, calibração e validação.

Os dados meteorológicos medidos, utilizados nas simulações pelo gerador climático, foram: i) os valores médios diários de precipitação, ii) temperatura mínima e máxima do ar, iii) umidade relativa, iv) radiação solar e v) velocidade do vento, todos para o intervalo de 1991 a 2008. Esses dados foram obtidos da estação meteorológica da EPAGRI, localizada nas coordenadas 26°14'52"S e 49°34'48"W, com altitude de 862 m. Os parâmetros estatísticos necessários para o gerador climático foram calculados a partir dos dados da estação. Para estimar a evapotranspiração potencial (ETP) o modelo utiliza o método de Penman-Monteith. Estes dados estão resumidos na Tabela 1.

Para a calibração do modelo foi utilizada a vazão observada na exutória da bacia do Rio Preto. Os dados pertencem à estação fluviométrica Avencal (código 65094500), com coordenadas de 26°16'00"S e 49°37'16"W e foram obtidos do Sistema de Informações Hidrológicas (HIDROWEB), disponibilizado pela Agência Nacional de Águas (ANA, 2008)

O modelo SWAT simula diferentes processos físicos na bacia, com o objetivo de analisar os impactos das alterações do uso do solo sobre o escoamento superficial e subterrâneo, produção de sedimentos e qualidade de água. O modelo é baseado em características físicas da bacia; usa dados de entrada, normalmente, disponíveis; é computacionalmente eficiente para operar sobre médias a grandes bacias.

Os dados espaciais são: modelo digital de elevação (MDE), uso e cobertura do solo e tipos de solos. Esses dados é inseridos por meio de uma interface entre o SWAT e o ArcView, denominada ArcSWAT.

O MDE foi gerado utilizando o método de redes triangular irregular (TIN - *Triangular Irregular Network*), usando as curvas de nível traçadas de 20 em 20 m e os pontos cotados da base topográfica vetorial. Esse método é utilizado para representar modelos de estruturas contínuas. O MDE foi elaborado com uma resolução de células de 30 m.

Tabela 1 - Parâmetros mensais requeridos para criação dos parâmetros estatísticos da estação meteorológica no modelo SWAT.

Parâmetros	
WLATITUDE	Latitude da estação meteorológica (graus)
WLONGITUDE	Longitude da estação meteorológica (graus)
WELEV	Altitude da estação meteorológica (metros)
RAIN_YRS	Número de anos dos dados meteorológicos observados que foram utilizados para calcular o RAIN_HHMAX
TMPMX	Temperatura máxima nos diferentes meses do ano (°C)
TMPMN	Temperatura mínima nos diferentes meses do ano (°C)
TMPSTDMX	Desvio padrão da máxima temperatura no mês.
TMPSTDMN	Desvio padrão da mínima temperatura no mês.
PCPMM	Média da precipitação no mês (mm)
PCPSTD	Desvio padrão da precipitação no mês (mm.dia ⁻¹)
PCPSKW	Coefficiente Skew para a precipitação diária no mês
PR_W(1)	Probabilidade de dia úmido (com chuva) seguido de um dia seco no mês
PR_W(2)	Probabilidade de dia úmido seguido de outro dia úmido no mês
PCPD	Número médio de dias chuvosos no mês
RAINHHMX	Precipitação máxima no período de 30 minutos no mês (mm)
SOLARAV	Radiação solar média diária no mês (MJ.m ⁻² .dia ⁻¹)
DEWPT	Ponto de orvalho médio diário no mês (°C)
WNDVAV	Velocidade do vento médio diário no mês (m.s ⁻¹)

A partir do MDE o SWAT divide a bacia em unidades de respostas hidrológica (HRU). Combina as características de solo, uso do solo, declividade e os dados climáticos da bacia delimitada e das respectivas sub-bacias. Desta forma, o modelo revela diferenças na evapotranspiração decorrentes dos diferentes tipos e usos do solo em cada sub-bacia.

O escoamento superficial é calculado pelo método da Curva Número (CN) que estima o escoamento superficial a partir dos mais variados tipos e usos de solos:

$$Q_{\text{sup}} = \frac{(P - Ia)^2}{P - Ia - S} \quad (1)$$

onde Q_{sup} é o escoamento superficial total (mm), P é a precipitação total (mm), Ia é a abstração inicial que abrange o armazenamento no terreno, a interceptação e a infiltração no solo antes de iniciar o escoamento superficial (mm), e S é o parâmetro de retenção (mm).

O escoamento superficial calculado pelo método da Curva Número (CN) foi estimado separadamente para cada HRU, para depois obter o escoamento total da bacia hidrográfica. Este processo aumenta a exatidão e fornece uma melhor descrição física do balanço hídrico.

Para a elaboração do mapa de uso do solo da bacia do Rio Preto, foram utilizadas imagens do satélite Landsat/TM-5, georreferenciadas, empregando-se o método de classificação supervisionada. Para esse estudo foram definidas seis classes de uso do solo: i) reflorestamento (pinus e eucalipto); ii) vegetação nativa (floresta nativa em diferentes estágios de crescimento e de regeneração); iii) pastagem (natural e plantada); iv) água (corpos de água naturais e artificiais); v) solo exposto (solos em época de preparo para o plantio, áreas urbanizadas e estradas); vi) agricultura (diferentes tipos de culturas anuais). Em seguida, para a classificação supervisionada, foram adquiridas amostras de treinamento (conjuntos de *pixels*) representativas de cada classe de uso, por meio de digitalização em tela sobre a imagem. Para a classificação das imagens foi empregado o método máxima verossimilhança. Este método descreve os valores dos *pixels* de uma amostra de treinamento por uma função de densidade de probabilidade. Assim, o classificador (algoritmo) examina a probabilidade de um *pixel* pertencer a uma determinada classe e o classifica na que apresentar maior probabilidade (Crosta, 1999).

Os mapas de tipos de solos, uso e cobertura do solo e declividade foram convertidos em matrizes (imagens) com uma resolução de células de 30 m, objetivando a combinação destes no modelo SWAT.

O restante dos dados foi retirado das características dos solos do levantamento do perfil de solo disponibilizado pela EMBRAPA (2004). Os perfis utilizados para os respectivos tipos de solo foram: i) CXa - E239; ii) NBa - E199; iii) LBA - E121; e v) RLd - E120 (EMBRAPA, 2004).

O SWAT simula quatro tipos de corpos d'água: açudes, áreas alagáveis, depressões e reservatórios. As três primeiras são localizadas dentro da sub-bacia, e fora do canal principal. Já os reservatórios são localizados no canal principal e assim recebem água de todas as sub-bacias à montante (Neitsch. *et al*, 2005). O balanço hídrico calculado para o reservatório localizado na bacia é:

$$V = V_{stored} + V_{flowin} - V_{flowout} + V_{pcp} - V_{evap} + V_{seep} \quad (2)$$

onde V é o volume de água no reservatório no final do dia (m^3), V_{stored} é o volume de água armazenado no reservatório no começo do dia (m^3), V_{flowin} é o volume de água que entra no reservatório durante o dia (m^3), $V_{flowout}$ é o volume de água que sai do reservatório durante o dia (m^3), V_{pcp} é o volume de chuva que cai no reservatório durante o dia (m^3), V_{evap} é o volume de água que é removido do reservatório pela evaporação durante o dia (m^3), e V_{seep} é o volume de água que é perdido pelo fundo do reservatório durante o dia (m^3).

Os dados de volume dos dois reservatórios localizados na área de estudo foram obtidos a partir de levantamentos batimétricos realizados com um mini-ADCP, juntamente com um GPS Topográfico de frequência simples (L1). Com os dados obtidos com o ADCP e o GPS foi possível

realizar a interpolação dos pontos com a inclusão dos dados batimétricos e altimétricos no ArcGIS 9.2 e Surfer.

Para o cálculo da vazão média anual dos dois reservatórios, foi adotada uma proporcionalidade entre as áreas de abrangência dos reservatórios e a área total da bacia, ponto onde existem valores medidos de vazão em um longo período de tempo.

Para a calibração do modelo foi adotado o período de dados de 14/12/1993 à 31/12/1997 como apresentado na Figura 3.



Figura 3 - Dados observados de vazão utilizados na calibração do modelo

No período de calibração, as entradas do modelo são variadas até que um ajuste aceitável é obtido. O modelo então é rodado com os mesmos parâmetros de entrada para o período de validação e um ajuste será determinado (Arnold *et al.*, 2005). Uma vez calibrados os parâmetros do modelo, este deve ser validado para situações semelhantes às que se quer aplicá-lo. Os resultados da verificação indicam se o modelo será capaz de reproduzir a série de dados não usados em sua calibração (Machado, 2002).

Neste estudo foram utilizados os dados de vazão para a calibração. Para analisar influência de cada parâmetro de entrada do modelo foi realizada a calibração manual seguida da automática.

Para avaliar o desempenho do modelo, os dados diários de vazão simulados pelo SWAT foram comparados estatisticamente com os observados na bacia, através do coeficiente de Nash e Sutcliffe (*NASH*) (Equação 3), e o desvio (*Dv*) dos dados simulados em relação aos dados observados (Equação 4).

$$NASH = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Em - Es)^2}{\sum_{i=1}^n (Em - \bar{E})^2} \quad (3)$$

onde *NASH* é o coeficiente de Nash e Sutcliffe (adimensional), *Em* é o evento monitorado (observado), *Es* é o evento simulado, \bar{E} é a média do evento observado no período da simulação e *n* é o número de eventos.

$$Dv = \left(\frac{E - E^*}{E} \right) \cdot 100 \quad (4)$$

onde Dv é o desvio padrão, E é o evento monitorado no período analisado e E^* é o evento simulado no mesmo período.

O valor de NASH varia desde o negativo infinito até um, sendo este último o indicativo de que o modelo está com um perfeito ajuste. Já para Dv , o valor varia entre zero e cem, sendo que o valor zero indica o perfeito ajuste para este método de avaliação, ou seja, não há desvio entre dados monitorados e simulados.

Para o estudo foram simulados quatro cenários para a bacia do Rio Preto. Os cenários têm por objetivo verificar a mudança no uso e cobertura do solo com relação ao escoamento superficial. A mudança foi verificada pelos hidrogramas elaborados para cada cenário. Os cenários simulados foram: 1) uso e cobertura atual (áreas com mata nativa, agricultura, pastagem, reflorestamento de pinus e outros); 2) mata nativa em toda área de estudo (sem ação antrópica); 3) agricultura; 4) uso e cobertura atual sem reservatórios.

4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

Calibração e Análises Estatísticas para avaliação do desempenho do modelo

Para verificar os parâmetros de simulação que mais influenciam no modelo SWAT, foi realizada a calibração manual onde foram testados todos os parâmetros da análise de sensibilidade. Assim, observou-se que os parâmetros que mudaram significativamente o escoamento total de água foram: a) Fator de resposta às variações na recarga do aquífero (dias) (Alpha_BF); b) Curva número (CN2); c) Fator de compensação de evaporação do solo (adimensional) (ESCO); d) Coeficiente de resposta do escoamento superficial (adimensional) (Surlag) e e) Período de tempo que a água se move da camada de solo mais profunda até o aquífero superficial (GW_Delay).

Concluída a calibração manual, foi realizada a calibração automática para obtenção dos valores mais adequados para os parâmetros escolhidos. A Tabela 2 apresenta os valores utilizados na simulação inicial (sem calibração) e na calibração manual, bem como os resultados obtidos para a calibração automática realizada pelo modelo SWAT.

A Tabela 3 apresenta os valores do coeficiente de NASH e Desvio (Dv) para a simulação inicial (sem calibração), com calibração manual e com calibração automática. Verifica-se que ocorreu uma melhora significativa para os dois parâmetros estatísticos analisados (NASH e Dv). Os valores de NASH passaram de -1,589 para -0,375 da simulação inicial para a calibração manual e

de -0,375 para 0,505 da simulação com calibração manual para a calibração automática. Já os valores de Dv passaram de -33,95 para -33,70 da simulação inicial para a calibração manual e de -33,70 para -4,96 da simulação com calibração manual para a calibração automática. Isto evidencia um melhor no ajuste do modelo se comparado com a simulação inicial (apenas com os dados de entrada).

Tabela 2 - Valores dos parâmetros utilizados nas simulações inicial (sem calibração), manual e automática.

Parâmetros	Sem Calibração	Calibração Manual	Calibração Automática
Alpha_BF	0,048	0,9	1,0
Mata Nativa	77	60	62
Pastagem	79	62	64
CN2	81	67	69
Reflorestamento	81	67	69
Agricultura	85	72	74
Água	92	92	94
ESCO	0,95	0,70	0,00
Surlag	4	1	0
GW_Delay	31	20	10

Tabela 3 - Valores de NASH e Dv para as simulações inicial (sem calibração), manual e automática.

Parâmetros	Sem Calibração	Calibração Manual	Calibração Automática
NASH	-1,589	-0,375	0,505
Dv	-37,95	-33,70	-4,96

Lopes (2008) encontrou valores de NASH e Dv, respectivamente, de -0,59 e -0,22 para calibração manual e, 0,42 e -0,18 para a calibração automática para uma bacia experimental (Nativa 1 com área de 14 ha). Já Machado (2002) encontrou valores de 0,90 e -12,7 para a simulação sem calibração e, 0,92 e -0,70 para a calibração.

A Figura 4 apresenta o gráfico de escoamento total na exutória da bacia do Rio Preto no período de 14/12/1993 a 14/12/1997, comparando os dados observados (medidos) de vazão com o escoamento total simulado. A calibração automática realizada pelo modelo subestimou as maiores vazões de pico dos dados medidos (monitorados). Sabendo-se que as variáveis de clima foram simuladas a partir de apenas uma estação de monitoramento meteorológico, a adoção da não variabilidade espacial destes parâmetros conseguiu simular os fenômenos reais de clima e, conseqüentemente, do escoamento total de água na bacia do Rio Preto.

Entendendo que o modelo não demonstrou um ótimo desempenho, mas foram os melhores visto que, muitos dados de entrada foram estimados para esta bacia, foram adotados os valores da calibração automática (conforme Tabela 2) para as simulações dos diferentes cenários. Todos os

cenários foram simulados com dados de precipitação anual de 1602,1mm (1994); 1917,9 mm (1995); 2244,4 mm (1996); e 1963,0 mm (1997).

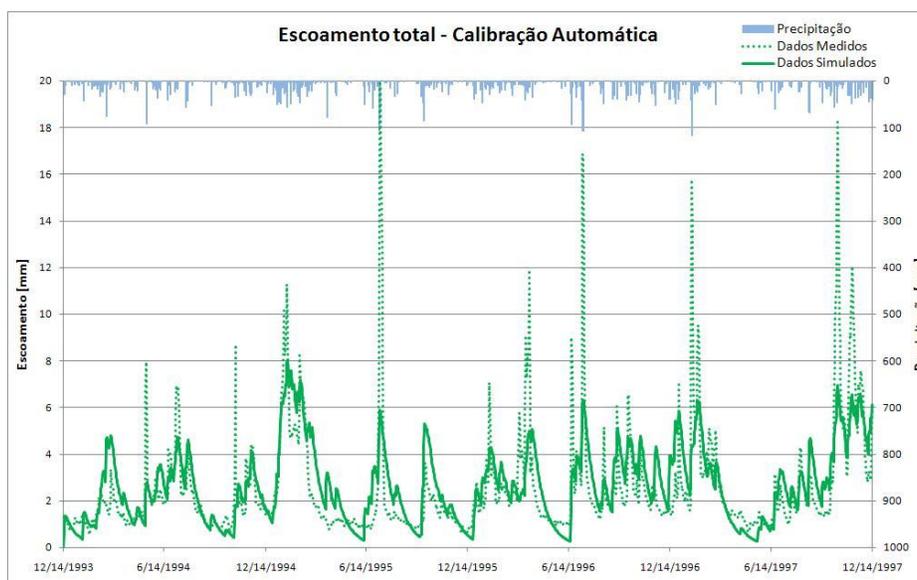


Figura 4 - Comparação entre os dados medidos e a simulação automática.

Distribuição Espacial – Escoamento Superficial

Com o objetivo de avaliar a distribuição espacial do escoamento superficial produzido, os resultados do modelo SWAT foram espacializados para cada sub-bacia e foram separados por cenário simulado. Para todos os cenários a distribuição espacial está apresentada apenas para o ano de 1996, o de maior escoamento superficial produzido.

Cenário 1 (uso e cobertura atual do solo)

A partir do mapa de uso e cobertura do solo atual verifica-se que a vegetação nativa ocupa 38,20% da área total da bacia, seguido de pastagem (23,43%) e de reflorestamento (20,68%). Constata-se também que, 7% da área apresentam solo exposto e 9,31% coberto por culturas anuais. Os corpos de água ocupam 1,1% (10,97 ha) da área total. A Figura 5 mostra a distribuição dos usos do solo. A Figura 6 apresenta a distribuição espacial do escoamento superficial produzido nas sub-bacias hidrográficas do Rio Preto para o cenário 1.

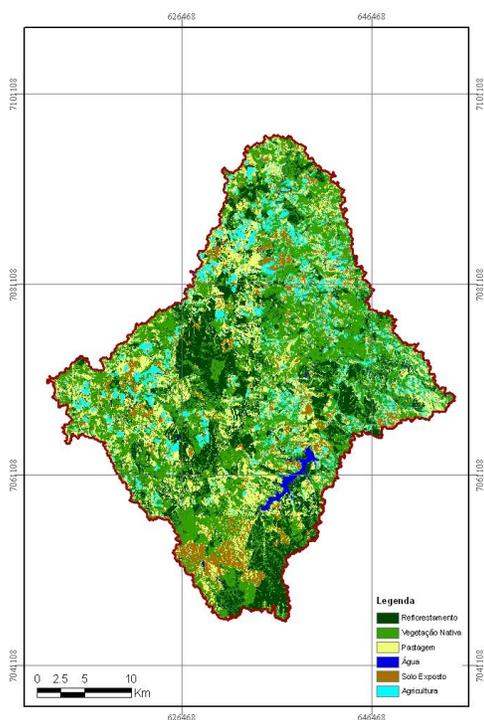


Figura 5 - Mapa de uso e cobertura do solo atual da bacia do Rio Preto.

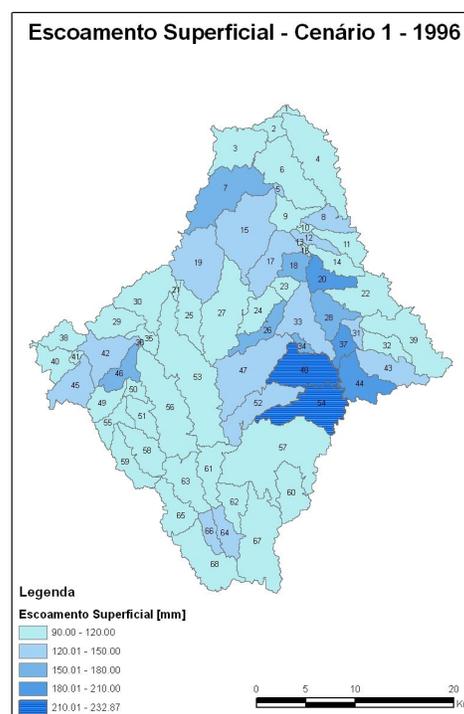


Figura 6 - Distribuição espacial do escoamento superficial no ano de 1996 para o cenário 1.

A Tabela 4 apresenta os valores das áreas e das vazões calculadas para os dois reservatórios presentes na bacia. Já a Tabela 5 mostra os valores calculados de volume e vazão média anual de cada reservatório.

Tabela 4 - Valores de área e vazão calculados para os reservatórios 1 e 2.

Bacia Hidrográfica	Área (km ²)	Vazão (m ³ .s)
Bacia do Rio Preto	1000,41	29,88
Reservatório 1	199,71	5,97
Reservatório 2	300,76	8,98

Tabela 5 - Valores de volume e vazão calculados para os reservatórios 1 e 2

Parâmetro	Reservatório 1	Reservatório 2
RES_EVOL [10 ⁴ m ³]	4546,41	44,0624
RES_RR [m ³ .s]	5,89	8,86
RES_ESA [ha]	694,1427	13,9263

Cenário 2 (Mata nativa)

A Figura 7 apresenta a distribuição espacial do escoamento superficial produzido nas sub-bacias hidrográficas do Rio Preto para o cenário 2.

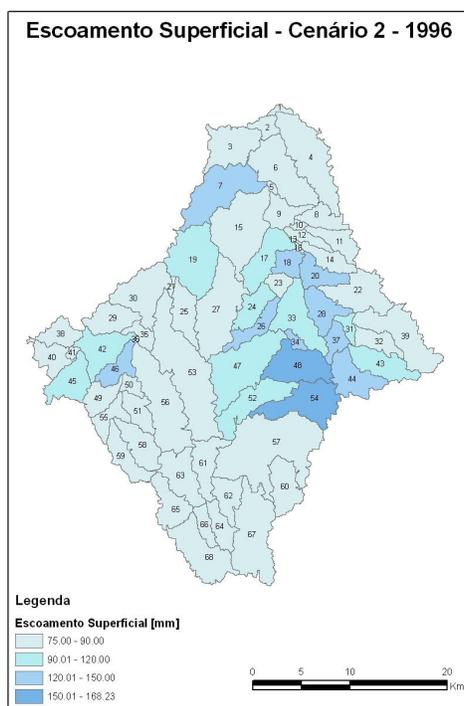


Figura 7 - Distribuição espacial do escoamento superficial no ano de 1996 para o cenário 2.

Cenário 3 (Agricultura)

A Figura 8 apresenta a distribuição espacial do escoamento superficial produzido nas sub-bacias hidrográficas do Rio Preto para o cenário 3.

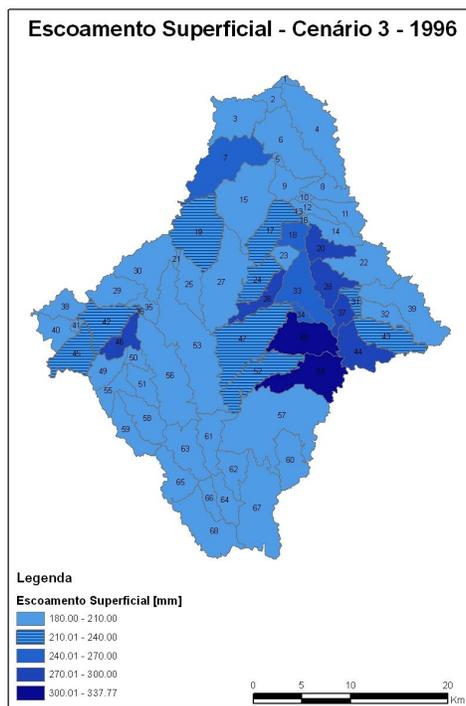


Figura 8 - Distribuição espacial do escoamento superficial no ano de 1996 para o cenário 3.

Cenário 4 (Uso atual sem reservatórios)

A Figura 9 apresenta a distribuição espacial do escoamento superficial produzido nas sub-bacias hidrográficas do Rio Preto para o cenário 4.

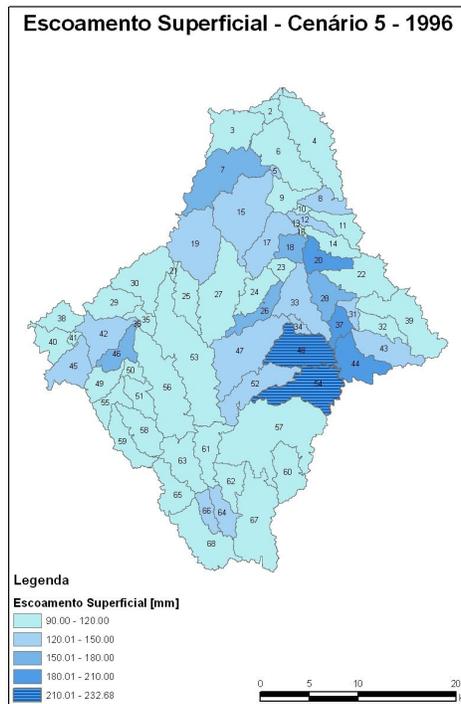


Figura 9 - Distribuição espacial do escoamento superficial no ano de 1996 para o cenário 5

Pelos resultados obtidos, a maior diferença encontrada entre os cenários nas simulações de escoamento superficial anual foi de 118,17 mm (variação de 57%), entre o cenário 3 (Agricultura) e cenário 2 (Mata nativa) no ano de 1996. Já para as simulações de escoamento superficial mensal, a maior diferença encontrada entre os cenários foi de 47,06 mm (variação de 40%), entre os cenários 3 (Agricultura) e 2 (Mata nativa) no mês de julho de 1996.

O cenário 3 (Agricultura) foi o que apresentou maior escoamento superficial de água na bacia. Já o uso do solo que proporcionou menor escoamento superficial foi o cenário 2 (Mata nativa). Isto foi observado por Hibbert (1967) e Bosch & Hewlett (1982). Esta verificação deve estar diretamente ligada com os valores adotados para a Curva Número (CN) pelo método de calibração automática, visto que, para o cenário 3 (Agricultura) a CN igual a 74 e para o cenário 2 (Mata nativa) a CN foi de 62 (valor mínimo para a bacia do Rio Preto). Isso vem a confirmar o que preconiza o método da Curva Número (CN) desenvolvida pelo Serviço de Conservação de Solos (SCS) dos Estados Unidos (USDA, 1986).

Os cenários 1 (uso e cobertura atual do solo) e 5 (uso e cobertura atual do solo sem reservatórios) apresentaram valores muito próximos para escoamento superficial durante todo o período de tempo simulado. A diferença encontrada pode ser observada somente se forem averiguado os valores absolutos mensais de escoamento superficial de ambos os cenários (Tabela 6). A maior diferença entre os cenários 1 e 5 foi de 0,93 mm, ou seja, uma variação de 0,75%.

Tabela 6 - Escoamento superficial mensal dos cenários 1 e 5.

Ano	Cenário 1	Cenário 5	Diferença (mm)	Diferença (%)
	Escoamento Superficial (mm)	Escoamento Superficial (mm)		
1994	8.9	8.92	0.02	0.22
1995	54.54	54.93	0.39	0.72
1996	124.03	124.96	0.93	0.75
1997	51.98	52.35	0.37	0.71

Análise em nível de sub-bacia

Com base nos mapas de distribuição espacial do escoamento superficial, apresentados anteriormente, foram escolhidas as sub-bacias que apresentam valores maiores e menores, comparativamente, de escoamento superficial para avaliar a distribuição espacial nos diferentes cenários.

Cenários 1 e 5

Para os cenários 1 e 5, as sub-bacias escolhidas para avaliação do escoamento superficial foram a 48 e a 25 (Tabela 7). A sub-bacia 48 apresentou maior escoamento superficial, em relação a 25. Isso pode estar sendo influenciado pelo uso do solo com agricultura e reflorestamento. Em relação à agricultura, esta representa 25,45% da área total da sub-bacia 48 e apenas 2,8% da sub-bacia 25. Já o reflorestamento é predominante na sub-bacia 25 (78,51%), e por esta razão o escoamento superficial foi menor. Isso confirma os resultados obtidos nas simulações de escoamento superficial apresentados.

Cenário 2 (Mata Nativa)

Para o cenário 2, as sub-bacias escolhidas para verificação do escoamento superficial foram as sub-bacias 35 e 48 (Tabela 8) Na Tabela 8 verifica-se que a sub-bacia 48 apresentou maior escoamento superficial, onde o solo predominante é o Nitossolo (86,77%), em relação à sub-bacia

35 que apresentou menor escoamento superficial e o tipo de solo é homogêneo (100% de Cambissolo).

Tabela 7 – Áreas (%) do uso e tipo de solo nas sub-bacias 48 e 25.

Sub-bacia 48 (ESC SUP maior)		Sub-bacia 25 (ESC SUP menor)	
Uso do Solo	Área (%)	Uso do Solo	Área (%)
Reflorestamento	22.24	Reflorestamento	78.51
Mata Nativa	26.07	Mata Nativa	15.81
Pastagem	26.24	Pastagem	2.88
Agricultura	25.45	Agricultura	2.8
Solo	Área (%)	Solo	Área (%)
Cambissolo	13.23	Cambissolo	100
Nitossolo	86.77		

* ESC SUP – Escoamento Superficial.

Tabela 8 – Áreas (%) do uso e tipo de solo nas sub-bacias 48 e 35.

Sub-bacia 48 (ESC SUP maior)		Sub-bacia 35 (ESC SUP menor)	
Uso do Solo	Área (%)	Uso do Solo	Área (%)
Mata Nativa	100	Mata Nativa	100
Solo	Área (%)	Solo	Área (%)
Cambissolo	13.23	Cambissolo	100
Nitossolo	86.77		

Cenário 3 (Agricultura)

Para o cenário 3, as sub-bacias escolhidas para verificação do escoamento superficial foram as sub-bacias 35 e 48 (Tabela 9). No cenário 3, ocorreu um maior escoamento superficial na sub-bacia onde houve predominância de Nitossolo (sub-bacia 48). Também nesse cenário observa-se um menor escoamento superficial onde 100% da área é constituída de Cambissolo (sub-bacia 35).

Tabela 9 – Áreas (%) do uso e tipo de solo nas sub-bacias 48 e 35.

Sub-bacia 48 (ESC SUP maior)		Sub-bacia 35 (ESC SUP menor)	
Uso do Solo	Área (%)	Uso do Solo	Área (%)
Agricultura	100	Agricultura	100
Solo	Área (%)	Solo	Área (%)
Cambissolo	13.23	Cambissolo	100
Nitossolo	86.77		

Observa-se que nos cenários 2 e 3 o que influenciou o escoamento superficial foi o tipo de solo, pois em cada um desses cenários o uso do solo foi considerado homogêneo. Considerando somente os dados de solo, esses cenários permitiram avaliar, de uma maneira geral, que as áreas que

contém os dois tipos de solo (Nitossolo e Cambissolo) possuíram maior escoamento superficial do que aquelas onde contém somente Cambissolo.

5 – CONCLUSÃO

Visando compreender a dinâmica hidrológica na bacia hidrográfica do Rio Preto (SC), o presente estudo utilizou o modelo SWAT .Os resultados obtidos permitem concluir que:

A partir dos resultados obtidos para a dinâmica hidrológica na bacia hidrográfica do Rio Preto (SC) pode-se inferir que o modelo SWAT ajustou de forma adequada a simulação de vazão para diferentes cenários de uso do solo, uma vez que os parâmetros estatísticos avaliados foram significantes.

O cenário de Agricultura em toda a bacia hidrográfica apresentou maior escoamento superficial, enquanto o menor foi obtido pelo uso de mata nativa, especialmente por causa do incremento da evapotranspiração.

O modelo SWAT permitiu a identificação do melhor cenário de uso do solo para escoamento superficial na bacia do Rio Preto. Entretanto, sugere-se que novos estudos sejam realizados com dados de entrada no modelo, referentes ao solo, uso do solo e ao modelo digital de elevação, com maior escala de detalhamento, para melhor compreensão da dinâmica hidrológica.

Sugere-se, ainda, a instalação de mais estações meteorológicas próximas à área de estudo visando à obtenção de maior quantidade de dados para o modelo, para simular de maneira mais adequada a variabilidade espacial da precipitação e dos fenômenos meteorológicos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao apoio da Companhia Volta Grande de Papel e da FINEP aos projetos/pesquisas desenvolvidos pelo Laboratório de Hidrologia da UFSC.

BIBLIOGRAFIA

AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS- ANA. Disponível em < <http://hidroweb.ana.gov.br/>> Acesso em outubro de 2008.

ARNOLD, J. G.; FOHRER, N. (2005). “SWAT 2000: current capabilities and research opportunities in applied watershed modeling”. Hydrological Processes, 19, PP. 563-572.

BORAH, D.K.; BERA, M. “Watershed–scale hydrologic and nonpoint–source pollution models: review of applications”. Transactions of the ASAE, v.47, n.3, pp.789–803, 2004.

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*, v.55, pp.3-23, 1982

BRAGA, B.; PORTO, M.; TUCCI, E.M. (2002a). “Monitoramento de quantidade e qualidade das águas. In: *Águas doces no Brasil: capital ecológico, uso e conservação*”. Org. por REBOUÇAS, A.C., BRAGA, B. e TUNDISI, J.G. 2.ed. São Paulo: Escrituras Editora. cap.19, pp.635-649.

CROSTA, A. P (1999). “Processamento digital de imagens de sensoriamento remoto”. Campinas, SP: IG/UNICAMP. 170p.

EMBRAPA. (1998). “Levantamento de reconhecimento dos solos do Estado de Santa Catarina”. Boletim de Pesquisa nº6. Rio de Janeiro: EMBRAPA-CNPS. 721p.

EMBRAPA. (1999). “Sistema brasileiro de classificação de solos”. Rio de Janeiro: Embrapa Solos. 412p.

EMBRAPA (2004a). “Levantamento de Reconhecimento de Solos de Santa Catarina”. Embrapa CNPS.

EMBRAPA (2004b). “Solos do estado de Santa Catarina”. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 745p.

EPAGRI/CIRAM. (2002). “Mapa de solos _ Unidade de Planejamento Regional do Planalto Norte Catarinense” (UPR4).

EPAGRI/CIRAM. (2008). “Zoneamento ecológico”. Disponível em <http://ciram.epagri.sc.gov.br/portal/website/pdf/agricultura/zoneAgroecologico/ZonAgroeco.pdf>. Acesso em: 29 de novembro de 2008.

HIBBERT, A.R. (1967). “Forest treatment effects on water yield. In: *Forest Hydrology*”. Org. por SOPPER, W.E.; LULL, H.W. (eds.) New York: Pergamon. p.527-543.

KLEIN, R. M. (1978). *Mapa Fitogeográfico do Estado de Santa Catarina*. Flora Ilustrada Catarinense. V Parte.

LOPES, N.H.Y.; KOBAYAMA, M. (2008). “Análise da produção de sedimento e da qualidade da água em microbacia experimental com SWAT” in Anais do VIII Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos, Campo Grande: UFMS. Nov. 2000, PP. 13.

MACHADO, R.E. (2002) “Simulação de escoamento e de produção de sedimentos em uma microbacia hidrográfica utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento”. 154f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade de São Paulo, Piracicaba.

MARKOWITZ, A.; GREEN, L.T.; LAINE, J. (2003). “The 3c’s: communicate, coordinate, collaborate doing together what we can’t do alone.Herndon”. *Water Resources Impact*, v.5, n.5, pp.03-07, sept.

NEITSCH, S. L.; ARNOLD, J. G.; KINIRY, J. R.; WILLIAMS, J. R. (2005). “Soil and Water Assessment Tool: Theoretical Documentation – Version 2005”. Temple: Agricultural Research Service (USDA) & Texas Agricultural Experiment Station (Texas A&M University). 541p.

PREFEITURA MUNICIPAL DE RIO NEGRINHO. (2008) Informações gerais. Disponível em: <<http://www.rionegrinho.sc.gov.br/caracteristicas.htm>>. Acesso em: 20 agosto de 2008.

SANTA CATARINA. (1986). “*Atlas de Santa Catarina*”. Florianópolis: GAPLAN/SUEGI; [Rio de Janeiro: Aerofoto Cruzeiro]. 173p.

USDA (1986). “*National engineering handbooks*”. Washington: USDA. (Section 4).