UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM

MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS

CENÁRIOS DE USO DO SOLO BASEADOS NA COBERTURA DE ÁREAS DE PRESERVAÇÃO PERMANENTE (APP) E SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA NA BACIA DO RIO SAPUCAÍ

Paula Capita Siqueira

Itajubá, Fevereiro de 2017

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

INSTITUTO DE RECURSOS NATURAIS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM

MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS

Paula Capita Siqueira

Cenários de uso do solo baseados na cobertura de Áreas de Preservação Permanente (APP) e simulação hidrológica na bacia do rio Sapucaí

Área de concentração: Diagnóstico, monitoramento e gestão ambiental.

Drª. Nívea Adriana Dias Pons (Orientadora)

Dr. Benedito Claudio da Silva (Co-orientador)

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

INSTITUTO DE RECURSOS NATURAIS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM

MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS

Paula Capita Siqueira

Cenários de uso do solo baseados na cobertura de Áreas de Preservação Permanente (APP) e simulação hidrológica na bacia do rio Sapucaí

Dissertação aprovada por banca examinadora em 23 de fevereiro de 2017, conferindo à autora o título de **Mestre em Meio Ambiente e Recursos Hídricos.**

Banca examinadora:

Drª. Nívea Adriana Dias Pons (Orientadora)

Dr. Benedito Claudio da Silva (Co-orientador)

Membro interno: Dra. Márcia Viana Lisboa Martins

Membro externo: Dra. Rochane de Oliveira Caram

Itajubá, Fevereiro de 2017

AGRADECIMENTO

Agradeço ao Programa de Pós-Graduação em Meio Ambiente e Recursos Hídricos (MEMARH) e Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI) pela oportunidade desta formação e à Fundação de Amparo a Pesquisa de Minas Gerais (FAPEMIG) pela bolsa concedida, sem a qual não poderia ter me dedicado a esta pesquisa.

Sou grata a Profª. Drª. Nívea por me receber no programa, confiar no desenvolvimento do trabalho e dar os direcionamentos necessários. Ao Prof. Dr. Benedito que "acolheu" esta pesquisa e orientou toda a parte da modelagem hidrológica, com muita paciência, didática e dedicação. À pesquisadora Rochane, por ter me recebido no CEMADEN para ensinar-me a rotina do HAND e por compor a banca de defesa junto a Profª. Márcia Viana, minha gratidão. Aos demais professores do IRN e MEMARH, especialmente Profª. Dra. Ana Lucia Fonseca e Dr. Rogério Melloni, com horizontes bem além de suas aulas. Aos colegas da pós-graduação, especialmente Cinthia, Mariana e Mábele.

Ao meu irmão Paulo, vulgo Nuno, sempre disponível para esclarecer minhas dúvidas com ArcGis e por ter me incentivado tanto, desde que esse mestrado era só uma possibilidade. Gratidão, mano! Aos amigos, colegas e professores da saudosa UFLA, em especial, Liliano (LEMAF), Antônio do Couto Jr. (LEMAF), Prof. Passarinho (DCF) e Prof. Gilberto Coelho (DEG). Aos pesquisadores Adriana Koumrouyan (INPE), Henrique Noguez Cunha (UFRGS) e Guilherme de Castro Oliveira (UFV) que colaboraram no esclarecimento de diversas dúvidas sobre o mapeamento das APP de topo de morro. Ao primo Thiago, pela presença de sempre e esclarecimentos jurídicos quanto às leis das APP. Agradeço ainda a uma "*web* alma boa", que não revela sua identidade, mas que aparece nas redes como "*Red Hood*" e que me ajudou, passo a passo, instalar a versão *Trial* do ArcGis em um momento crucial do desenvolvimento desta pesquisa (parece piada, mas é verdade). Aos bolsistas e pesquisadores que desenvolvem e trabalham com o MHD/INPE, especialmente à Anne Negrão. Ao Projeto "Desenvolvimento de um Sistema de Prognóstico por Conjunto de Chuvas Extremas e sua Aplicação em Ações de Prevenção a Desastres Naturais" e coordenadora Dra. Chou Sin Chan (CPTEC/INPE), ao qual esta pesquisa está vinculada.

Toda gratidão aos meus pais, por serem os melhores avós do mundo! Por serem sinônimos de apoio, incentivo, tolerância, paciência e amor. Ao meu pai, por ser inspiração no cuidar da terra, da água e dos alimentos. E à minha mãe, que sem a dedicação dela ao meu filho, tudo seria muito mais difícil. Ao Romeu, que virou meu mundo do avesso e junto com a Tais, me fazem rir, 'pirar' e crescer todos os dias ♥. A todos os familiares e amigos que deram aquela força.

Gratidão ao acaso (ou não) desta vida, que me permitiu ser filha desse sul de Minas, com os pés sempre perto da Mantiqueira e tantas belezas dessa região. E por fim, gratidão a esse mundão Terra, planeta água! Que com sua resiliência, nos abriga, alimenta e suporta.

RESUMO

As mudanças no uso e cobertura do solo (UCS) podem alterar o ciclo hidrológico em bacias de pequena e grande escala. Diversos estudos indicam que a redução da cobertura florestal provoca incremento da vazão; além de outros impactos, como a redução da recarga subterrânea e consequentemente, redução da vazão de nascentes. O novo Código Florestal, Lei 12.651/2012, alterou as definições para áreas de preservação permanente (APP) localizadas nos topos de morro; o que reduziu drasticamente a área legalmente amparada por esta categoria de proteção. Este estudo teve o objetivo de verificar alterações hidrológicas decorrentes de mudanças no UCS baseadas nas definições revogada e vigente de APP de topo de morro, bem como em tendências de uso do solo na bacia rio Sapucaí, região sudeste do Brasil. Para tanto, mapearam-se as APP de topo de morro de acordo a definição revogada e lei vigente, utilizando-se a metodologia do MDE invertido. Tal mapeamento embasou a elaboração de quatro cenários hipotéticos de UCS na bacia, com diferentes percentuais de cobertura florestal. Três cenários foram baseados na cobertura das APP de topo de morro e tendências de ocupação para a região e aplicados a toda bacia. Um quarto cenário foi aplicado a apenas uma sub-bacia e considerou a cobertura florestal nativa em área total, exceto para áreas urbanas. Para a simulação hidrológica utilizou-se o Modelo de Grandes Bacias do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (MGB-IPH), que foi ajustado para as condições atuais de UCS e posteriormente, simulou-se o comportamento hidrológico mediante os diferentes cenários. De acordo com o mapeamento realizado, a redução das APP de topo de morro para a bacia do rio Sapucaí é superior a 99% com a aplicação do código vigente. Não se verificou diferenças significativas no comportamento hidrológico da bacia considerando as condições de UCS atual e os três cenários baseados na cobertura das APP. No terceiro e quarto cenário aplicados a sub-bacia verificou-se o aumento das vazões médias que coincide com o aumento da cobertura florestal. Destaca-se que esse aumento resultou da maior quantidade de água no solo, uma vez que o escoamento superficial foi reduzido. Para simulações com valor fixo de resistência superficial, o aumento na cobertura florestal resultou em redução das vazões.

ABSTRACT

Changes in land use and land cover (LULC) can modify the hydrological cycle in small and large-scale basins. Several studies indicate that the reduction of forest cover causes an increase in flow; Besides other impacts, such as the reduction of the underground recharge and consequently, the reduction of the flow of springs. The new Forest Code, Law 12.651 / 2012, changed the definitions for areas of permanent preservation (APP) located in the tops of the hill; Which drastically reduced the area legally protected by this category of protection. This study aimed to verify hydrological changes resulting from changes in the UCS based on the revoked and current definitions of hilltop APP, as well as on land use trends in the Sapucaí river basin, southeastern region of Brazil. In order to do so, the hilltop APPs were mapped according to the abrogated definition and current law, using the inverted DEM (Digital Elevation Model) methodology. This mapping was based on the elaboration of four hypothetical scenarios of LULC in the basin, with different percentages of forest cover.

Three scenarios were based on the coverage of the hilltop APP and tendencies of occupation for the region and applied to the entire basin. A fourth scenario was applied to only one sub-basin and considered native forest cover in total area except for urban areas. For the hydrological simulation the Large Basins Model of the Hydraulic Research Institute (MGB-IPH) was used, which was adjusted to the current conditions of UCS and later, the hydrological behavior was simulated through the different scenarios. According to the mapping carried out, the reduction of the hilltop APP for the Sapucaí river basin is over 99% with the application of the current code. There were no significant differences in hydrological behavior of the basin considering the current UCS conditions and the three scenarios based on PPP coverage. In the third and fourth scenario applied to the sub-basin was verified the increase of average flows that coincides with the increase of forest cover. It should be noted that this increase resulted from the higher amount of water in the soil, since the surface runoff was reduced. For simulations with fixed value of surface resistance, the increase in forest cover resulted in a reduction in flow rates.

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ANA – Agência Nacional das Águas

APP – Área de Preservação Permanente

BRS – bacia do rio Sapucaí

CONAMA – Conselho Nacional de Meio Ambiente

Etp – Evapotranspiração

MDE – Modelo Digital de Elevação

MGB - IPH – Modelo de Grandes Bacias do Instituto de Pesquisas Hidráulicas

NCF – Novo Código Florestal

SIG – Sistema de Informação Geográfica

UCS – Uso e cobertura do solo

UFLA – Universidade Federal de Lavras

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

UNIFEI – Universidade Federal de Itajubá

URH – Unidade de Resposta Hidrológica

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 9

2. OBJETIVOS 11

2.1. GERAL 11
2.2. ESPECÍFICOS 11

3. REFERENCIAL TEÓRICO 12

3.1. CONCEITOS GERAIS 12
3.2. MODELOS HIDROLÓGICOS 14
3.3. MODELAGEM HIDROLÓGICA INTEGRADA ÀS GEOTECNOLOGIAS 17
3.4. USO E COBERTURA DO SOLO (UCS) E O REGIME HIDROLÓGICO 19
3.5. ÁREAS DE PRESERVAÇÃO PERMANENTE: ASPECTOS LEGAIS E MAPEAMENTO EM UM SIG 22

4. METODOLOGIA 27

4.1. CARACTERIZAÇÃO FISIOGRÁFICA DA ÁREA DE ESTUDO 28
4.2. O MODELO DE GRANDES BACIAS (MGB-IPH) 32
4.3. DADOS DE ENTRADA PARA O MODELO E PROGRAMAS UTILIZADOS 35
4.3.1. DADOS HIDROCLIMÁTICOS 42
4.4. MAPEAMENTO DE ÁREAS DE PRESERVAÇÃO PERMANENTE (APP) 44
4.5. CENÁRIOS DE USO E COBERTURA DO SOLO 45
4.6. SIMULAÇÕES A PARTIR DOS CENÁRIOS DE USO DO SOLO 47

5. RESULTADOS 47

5.1. MAPEAMENTO DAS ÁREAS DE PRESERVAÇÃO PERMANENTE – APP E CONFLITOS DE USO DO SOLO 47
5.2. CENÁRIOS DE USO DO SOLO 56
5.3. SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA 59
5.3.1. DEFINIÇÃO DAS URH 59
5.3.2. CALIBRAÇÃO 60
5.3.3. SIMULAÇÃO DOS CENÁRIOS HIPOTÉTICOS 64
5.3.4. SIMULAÇÕES COM VALOR FIXO DA RESISTÊNCIA SUPERFICIAL (R_S) 71

6. DISCUSSÃO 73

6.1. MAPEAMENTO DAS ÁREAS DE PRESERVAÇÃO PERMANENTE – APP E CONFLITOS DE USO DO SOLO 73
6.2. SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA 75
6.2.1. SIMULAÇÕES COM VALOR FIXO DA RESISTÊNCIA SUPERFICIAL (R_S) 78

7. CONCLUSÃO 78

8. REFERÊNCIAS 79

1. INTRODUÇÃO

O Brasil possui uma das maiores reservas de água doce do mundo, entretanto, a distribuição desse recurso é bastante heterogênea no território. A região Norte abriga 5% da população total e concentra aproximados 80% dos recursos hídricos; enquanto que nas bacias junto ao Oceano Atlântico que concentram 45,5% da população, estão disponíveis apenas 2,7% destes recursos (ANA, 2015). Existem, ainda, situações desfavoráveis em períodos de estiagem no semi-árido brasileiro e em cidades de médio e grande porte (TUCCI; HESPANHOL; NETTO, 2000). A crise hídrica que atingiu a Região Metropolitana de São Paulo, outras capitais e cidades interioranas em 2014, decorrente dos menores volumes pluviométricos e falhas de gestão e planejamento (ANA, 2015), ressalta a necessidade de estudos hidrológicos que subsidiem o manejo de bacias hidrográficas e políticas para a garantia da disponibilidade de água.

O uso e ocupação do solo implicam distintos comportamentos nos atributos do solo e da água, sendo que a remoção da vegetação nativa tem causado aumento significativo dos processos que levam à degradação de imensas áreas, com prejuízos aos recursos hídricos e à biodiversidade (PINTO et al., 2009); com destaque para aumento da suscetibilidade a erosão e consequente, assoreamento de cursos d'água e reservatórios.

Estudos de simulação hidrológica possibilitam, entre outras aplicações, a previsibilidade do regime fluvial, assim como as taxas de escoamento superficial em pequenas e grandes bacias hidrográficas, sob diferentes cenários climáticos e de cobertura do solo. A integração da modelagem hidrológica aos Sistemas de Informação Geográfica (SIG) permite manipular grande volume de dados, especializar as variáveis, produzir mapas temáticos, entre outras aplicações. Além do mais, a melhor qualidade e acessibilidade aos produtos do Sensoriamento Remoto favorecem a acurácia e confiabilidade da base de dados geográficos. Este tipo de investigação científica é altamente aceito, consistindo no estado-da-arte do conhecimento na área de engenharia de água e solo e recursos hídricos (STACKELBERG et al., 2007; GREEN et al., 2006; MARSIK; WAYLEN, 2006 *apud* VIOLA et al. 2009).

Considerando que o setor agrícola brasileiro é o principal usuário consuntivo dos recursos hídricos, é na área física ocupada por esse setor que pode ocorrer a maioria das ações para a melhoria da utilização da água (MMA, 2006). A capacidade de identificação e predição dos impactos nos recursos hídricos advindos dos diferentes usos do solo consiste em uma das aplicações mais relevantes dos modelos hidrológicos, fundamental para o planejamento

ambiental da bacia hidrográfica (VIOLA et al., 2009). Assim, a integração entre as políticas hídrica, ambiental e agrícola é fundamental para o desenvolvimento viável de um país com abundantes recursos naturais, economia baseada na produção agropecuária e em que hidroeletricidade representa mais de 70% de sua matriz energética elétrica (MMA, 2006; BRASIL, 2016).

A remoção da cobertura natural, seja florestal ou campestre, para dar lugar a áreas agrícolas ou urbanas altera toda a dinâmica hidrológica de uma bacia hidrográfica, desencadeando outros processos, como erosão e assoreamento de cursos d'água (TAMBOSI et al. 2015), podendo influenciar inclusive, reservatórios e outras bacias a jusante. A expansão agrícola e urbana ocorre, em geral, sem planejamento, ocupando, não raro, Áreas de Preservação Permanente (APP). Essas áreas, embora legalmente protegidas, são bastante vulneráveis e em grande parte do território nacional, são alteradas ou degradadas, não cumprindo assim suas "funções ambientais" de conservação dos recursos hídricos, solo e biodiversidade.

Em 2012, instituiu-se o "Novo Código Florestal" pela Lei 12.651 (BRASIL, 2012), que entre outras modificações, definiu novos critérios para as APP's de topo de morro e montanha, bem como reduziu a largura das matas ciliares com base no leito regular do rio e não mais no leito mais alto. Diferentes cenários de uso do solo simulados com base em tendências desta nova lei podem gerar distintas respostas hidrológicas, o que constitui em importante ferramenta para gestão dos recursos hídricos, além de fomentar a discussão e reflexão sobre o tema embasada em dados empíricos.

Na bacia em que se desenvolveu este estudo grande parte da cobertura florestal foi removida e substituída pela agropecuária, que ocupa a maior parte do território. Além disso, nos últimos anos, ocorreu expansão urbana significativa nas cidades mais populosas, tais como Pouso Alegre, Santa Rita do Sapucaí e Itajubá. É possível observar em toda bacia, em diferentes intensidades, a expansão urbana e agrícola irregular, assim como processos erosivos e de assoreamento dos cursos d'água. Ademais, as três cidades ora citadas, que surgiram e crescem às margens do Sapucaí ou de seus tributários, guardam registros de enchentes severas, de grande prejuízo econômico e social.

Neste trabalho buscou-se conhecer o comportamento hidrológico desta bacia e prever modificações a partir de cenários de uso do solo, a fim de contribuir para o fomento de

políticas públicas efetivas nas áreas agrícolas e urbanas, capazes de conservar os recursos hídricos da bacia, favorecendo a disponibilidade e qualidade da água.

2. OBJETIVOS

2.1. GERAL

Compreender como o uso e cobertura do solo pode alterar o regime hidrológico de bacias hidrográficas, a partir cenários hipotéticos e simulações de um modelo hidrológico conceitual distribuído aplicado à bacia do rio Sapucaí, região sudeste do Brasil.

2.2. ESPECÍFICOS

- Mapear as Áreas de Preservação Permanente – APP da bacia;
- Mapear as APP de topo de morro de acordo com o Novo Código Florestal e Resolução CONAMA 303/2002
- Criar cenários hipotéticos de uso do solo baseados na cobertura vegetal das APP;
- Ajustar o Modelo de Grandes Bacias do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (MGB-IPH) (COLLISCHON, 2001) para a área de estudo;
- Comparar as respostas hidrológicas do MGB-IPH em diferentes cenários de uso do solo.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1. CONCEITOS GERAIS

A hidrologia geográfica estuda os processos que alteram os fluxos de água ao longo do ciclo hidrológico terrestre, sua distribuição espacial na bacia hidrográfica e a influência de fatores antrópicos e naturais (WARREN, 2013). Posto que o relevo e hidrografia sejam agentes formadores da paisagem, tem-se a bacia hidrográfica como a unidade de estudo mais adequada, uma vez que constitui área de captação natural de água de precipitação que faz convergir o escoamento para um único ponto de saída. Sobre o território da bacia estão as atividades humanas; o que ocorre nesses limites é consequência das formas de ocupação do solo e utilização das águas que para ali convergem (PORTO; PORTO, 2008).

De acordo com Lima; Zakia (2000), a área de uma bacia hidrográfica influencia na quantidade de água produzida, enquanto que a forma e o relevo atuam sobre o regime hidrológico e a taxa de sedimentação. Já o padrão de drenagem interfere na disponibilidade de sedimentos e taxa de formação do deflúvio.

Estudos hidrológicos foram, no passado, avaliações de apenas dois componentes do ciclo hidrológico: a precipitação, como entrada e o deflúvio, como saída do sistema. Evaporação e armazenamento eram quase desconsiderados na análise. Sabe-se, entretanto, da importância em compreender o conjunto de processos físicos que ocorre em uma bacia possibilitando a interpretação de resultados, suas limitações e aplicabilidade a outras regiões (MCCULLOCH E ROBINSON, 1993 *apud* RENNÓ; SOARES, 2000).

O regime hidrológico ou a produção de água em uma bacia hidrográfica é determinado por fatores de natureza climática ou hidrometeorológica e por suas características físicas, geológicas e topográficas (BARBOSA JUNIOR, 2016). Temperatura, umidade e vento são importantes pela influência que exercem na precipitação e evaporação. A topografia é importante pela sua influência na precipitação, que juntamente com o solo e a vegetação determinam as taxas de infiltração e escoamento superficial, assim como a ocorrência de lagos e áreas alagáveis. As características geológicas, além de influenciarem a topografia, definem o local do armazenamento (superficial ou subterrâneo) da água proveniente da precipitação (BARBOSA JUNIOR, 2016).

Os processos hidrológicos em uma bacia possuem duas direções predominantes de fluxo, vertical e longitudinal. O fluxo vertical é representado pela precipitação e

evapotranspiração; e o longitudinal pelos escoamentos no gradiente da superfície (escoamento superficial, subsuperficial e rios) e o subterrâneo (TUCCI; CLARK, 1997). De forma simplificada, é possível descrever o ciclo iniciando-se com uma precipitação, parte da água que chega a superfície infiltra, desde que a cobertura assim o permita; e vai preencher os espaços vazios do solo até a saturação, quando então, ocorre o escoamento superficial. Tanto a água escoada, quanto a infiltrada alcançarão as cotas mais baixas do relevo, formando os cursos d'água.

A precipitação corresponde a "entrada" de água no ciclo hidrológico, majoritariamente sob a forma de chuva, considerando insignificante a contribuição de outras formas como orvalho e neve nas condições climáticas do Brasil. O tempo e a intensidade da chuva interferem na resposta hidrológica, sendo que eventos extremos, de chuva ou seca, podem apresentar consequências maiores ou menores em função do clima e dos tipos de relevo, solo e cobertura superficial.

O processo de infiltração é determinante para o abastecimento do lençol freático assim como para as taxas de deflúvio. A infiltração de água no solo é um fenômeno físico que consiste na entrada de água no solo pela sua superfície, sob a influência de propriedades intrínsecas (atributos de solo e relevo), de características impostas pelo manejo e pela intensidade e volume de chuva que atinge a superfície (BARCELOS; CASSOL; DENARDIN, 1999).

A evapotranspiração constitui-se na transferência de água do solo para a atmosfera por evaporação. De acordo com Best et al. (2003) pode ser divida em três componentes: interceptação, transpiração e evaporação do solo. É a soma dos componentes de transpiração, evaporação do solo e evaporação da água interceptada (SOARES; VIANEI, 2002). Depende, portanto, do tipo e estrutura da cobertura vegetal, das condições edáficas e climáticas, especialmente, temperatura e vento.

O escoamento superficial, ou deflúvio, ocorre quando o solo encontra-se saturado seja pela água que infiltrou a partir da superfície (de cima para baixo) ou por fluxo ascendente, de camadas inferiores. O relevo, tipos de solo e de cobertura vegetal, bem como manejo do solo tem influencia direta neste processo que, por sua vez, pode desencadear processos de erosão e assoreamento.

Por fim, a drenagem subterrânea é água que se desloca nas camadas mais profundas do solo, abaixo da zona das raízes e portanto, indisponível para evapotranspiração (BEST et al., 2003).

Entre os desafios da hidrologia segundo Mediondo; Tucci (1997) está a representação dos processos hidrológicos em diferentes escalas espaciais e temporais. Os fenômenos hidrológicos da micro-escala (< 10^{-4} km²) podem ocorrer de forma distinta ou não ocorrer na meso (10 a 10²) e macro-escala (> 10^{4} km²), devido ao fator de escala dos processos hidrológicos (TUCCI, 2008). O mesmo autor destaca ainda a carência de dados no Brasil para as micro e meso-escalas e o fato de que os processos, normalmente, estão dentro da percepção da população na micro-escala. Na meso e macro-escala é que ocorrem os usos da água em alta demanda; como pelo setor elétrico, irrigação ou abastecimento urbano, o que gerou a necessidade de ter informações sobre o recurso, explicando a existência de estações hidrométricas nestas escalas. Ainda assim, por motivos diversos, muitas estações apresentam ausência de dados em longos períodos de tempo, comprometendo a qualidade da base de dados.

Com exceção às bacias experimentais, estudar processos hidrológicos na micro-escala demanda uma base de dados pouco acessível no Brasil. Além da carência de dados hidrométricos e climatológicos precisos; informações sobre relevo e tipos de solo nesta escala, demandam estudos específicos e por sua vez, tem seu custo. Representar a heterogeneidade espacial dos sistemas hídricos, bem como as incertezas em que parâmetros e processos são medidos em diferentes escalas é um dos aspectos desafiadores da hidrologia na atualidade (MEDIONDO; TUCCI, 1997).

3.2. MODELOS HIDROLÓGICOS

Processos ambientais, como o ciclo hidrológico, são bastante complexos, tipicamente tridimensionais e dependentes do tempo. A modelagem matemática possibilita então, formas de estudar tais processos. Modelos matemáticos são abstrações da realidade que visam representar um sistema complexo de forma simples; sendo que o melhor modelo é aquele representa com maior realismo e menor complexidade, com base na concordância entre as saídas do modelo e as observações reais (WAINWRIGHT; MULLIGAN, 2004; TUCCI, 1998).

Em hidrologia, modelos representam os fluxos e armazenamento de água no contexto de bacias hidrográficas e possibilita a avaliação dos processos hidrológicos em diferentes escalas espaciais e temporais (WARREN, 2013; SPRUIL et al. 2000). Viola (2011) conceitua um modelo hidrológico chuva-vazão como uma representação de fenômenos associados ao ciclo hidrológico em bacias hidrográficas, capaz de simular respostas como função de características geomorfológicas e mudanças climáticas. As aplicações desse tipo de modelo incluem a avaliação de estratégias de gerenciamento dos recursos hídricos, estimativa de vazões e níveis dos rios, cheias de projeto, análise dos impactos das alterações do uso da terra sobre os recursos hídricos, impactos sobre a ecologia aquática, propagação de sedimentos e poluição, simulação dos efeitos de mudanças climáticas, entre outros (WAGENER et al., 2004, TUCCI, 2005).

São diversos os modelos hidrológicos já disponíveis e utilizados para diferentes fins, alguns exemplos: *Soil and Water Assessment Tools* - SWAT (NEITSCH et al., 2011) *Distributed Hydrology Soil Vegetation Model* – DHVSM (WIGMOSTA et al., 1994), *Soil Moisture Accounting Procedure* - SMAP (Saraiva et al., 2011), *Lavras Simulation of Hydrology* - LASH (BESKOW et al., 2011), Modelo de Grandes Bacias / Instituto de Pesquisas Hidrológicas - MGB/IPH (COLLISCHONN et al., 2001) e Modelo Hidrológico Distribuído / Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - MHD / INPE (RODRIGUEZ; TOMASELLA, 2011), dentre outros.

Modelos hidrológicos podem ser aplicados tanto para compreensão do regime hidrológico de uma bacia hidrográfica sob diferentes condições climáticas e de uso do solo, quanto para finalidades específicas como: previsão de vazão, estimativas da quantidade de água no solo, estimativas de erosão de solo e taxas de sedimentação em um reservatório hidroelétrico.

A água disponível nos rios pode ser destinada ao abastecimento público, irrigação, navegação, geração de energia, entre outros. Por isso, prever a vazão do rio em curto ou longo prazo é de interesse social e econômico. A previsão de vazão pode ser realizada em curto prazo com antecedência de poucas horas até cerca de 14 dias e em longo prazo, com antecedência de até nove meses (SILVA; TUCCI; COLLISCHONN, 2006). São exemplos de aplicação para previsão de vazão no Brasil os estudo de Souza; Santos; Kobiyama (2009) que aplicaram o SWAT a bacia do alto rio Negro, Collischonn et al. (2007) utilizaram o MGB-

IPH na bacia do alto Uruguai e Silva et al. (2007) que também aplicaram o MGB-IPH na bacia do rio São Francisco.

Beskow et al. (2009) utilizou o modelo distribuído PC Raster para estimar erosão de solo na região do alto rio Grande, à montante de um reservatório hidroelétrico. Silva et al. (2015) aplicou o MHD-INPE para estimar quantidade de água no solo na bacia do rio Purus, região Amazônica que abrange territórios do Brasil, Peru e Bolívia.

As classificações aplicadas a modelos hidrológicos abrangem distintos aspectos, associados a sua estrutura, objetivos, discretização do tempo e espaço, dentre outros (VIOLA, 2011). Em geral, os modelos são classificados de acordo com o tipo de variáveis utilizadas na modelagem (determinísticos ou estocásticos), o tipo de relações entre essas variáveis (empíricos ou conceituais), a forma de representação dos dados (discretos ou contínuos), a existência ou não de relações espaciais (pontuais ou distribuídos) e a existência de dependência temporal (estáticos ou dinâmicos) (RENNÓ; SOARES, 2000).

De acordo com Warren (2013), modelos hidrológicos são classificados, em um primeiro nível, entre determinísticos e estocásticos; sendo que os determinísticos podem ser: empíricos, conceituais-concentrados e modelos distribuídos de bases físicas. Modelos empíricos, também chamados “caixa-preta” não consideram os processos físicos que representam, transformam a precipitação em vazão por técnicas estatísticas; apresentando como principal vantagem sua rapidez e facilidade tanto na elaboração quanto na atualização dos parâmetros em tempo real (SILVA et al., 2007; WARREN, 2013). Modelos conceituais procuram representar de forma concentrada, por valores médios para toda a bacia, os fluxos e armazenamentos em diferentes elementos (sub-bacias, microbacias) da bacia; enquanto que os distribuídos de bases físicas calculam os fluxos de água e/ou energia por equações diferenciais parciais para cada elemento da bacia estudada (WARREN, 2013). Os modelos distribuídos permitem uma associação direta com as características físicas da bacia, seja vegetação, solo ou geologia, uma vez que descrevem melhor a variabilidade espacial dos processos e variáveis de entrada (SILVA et al. 2007).

Um modelo é dito estocástico quando pelo menos uma das variáveis envolvidas tem comportamento aleatório (RENNÓ; SOARES, 2000). Modelos estocásticos são derivados da análise de séries temporais, na qual uma sequência de eventos é tratada como dependente do tempo (WARREN, 2013).

3.3. MODELAGEM HIDROLÓGICA INTEGRADA ÀS GEOTECNOLOGIAS

De forma genérica, um modelo hidrológico demanda informações altimétricas, pedológicas, hidrométricas, climatológicas, além do uso e cobertura do solo (UCS). À exceção dos dados climatológicos e hidrométricos, as demais informações são, em geral, produtos das geotecnologias.

Com os avanços tecnológicos computacionais, as geotecnologias despontaram como importante fonte de dados e ferramenta de trabalho, ao possibilitar a obtenção da informação geográfica a partir de sensores remotos, bem como o processamento destas informações de forma automatizada e cada vez mais eficiente. Essa evolução se destaca com os produtos do sensoriamento remoto, especialmente os orbitais, com diferentes especificidades e para diferentes aplicações. Atualmente mais acessíveis, as geotecnologias contribuem sobremaneira para obtenção da informação geográfica de melhor qualidade.

As primeiras iniciativas em integrar os SIG aos modelos hidrológicos começaram nas décadas de 1960 e 1970; concentrando-se na obtenção dos parâmetros de entrada e utilização do SIG como interface para modelos de simulação (MELO et al. 2008; MARTIN et al. 2005 *apud* FAN; COLLISCHON, 2013).

A utilização de dados orbitais na hidrologia ganhou destaque na última década principalmente devido à diversificação dos sensores voltados ao monitoramento de mudanças hidrológicas e climatológicas globais. Entre as diversas aplicações estão a estimativa de parâmetros superficiais (e. g. índice de área, foliar, rugosidade superficial, altura dossel, etc.), estimativas hidrológicas como precipitação, evapotranspiração, teor de água no solo, total de água armazenada na superfície, nível de rios e reservatórios, vazões e qualidade da água; estimativas auxiliares como temperatura superficial, radiação incidente, vapor de água na atmosfera, entre outros (SCHULTZ; ENGMAN, 2000; LIANG, 2004; LAKSHMI, 2005; CAZENAVE; SAVENIJA, 2008 *apud* WARREN, 2013).

O primeiro modelo a vincular a obtenção de seus parâmetros a um SIG foi o TopModel, um modelo de previsão de vazão baseado na topografia obtida de um MDE (FAN; COLLISCHON, 2013). Atualmente, tem-se interfaces de modelos hidrológicos integradas a determinados SIG's; são exemplos a extensão ArcSWAT, que opera o modelo SWAT na plataforma ArcGis (SWAT, 2016) e a extensão do MGB-IPH habilitada para o SIG MapWindow (FAN; COLLISCHON, 2013), assim como o *plugin* IPH-HidroTools

desenvolvido para etapa de pré-processamento dos dados, uma ferramenta gratuita (*opensource*) e nacional (SIQUEIRA et al. 2016).

Estudos de modelagem hidrológica iniciam-se, em geral, com a delimitação da bacia hidrográfica sobre um Modelo Digital de Elevação (MDE) ou *Digital Elevation Model* (DEM), do inglês. Na forma trivial, MDE's são arquivos que contêm registros altimétricos estruturados em linhas e colunas georreferenciadas (formato raster) como uma imagem com um valor de elevação em cada pixel (VALERIANO, 2008). Deste mesmo arquivo derivam-se as direções de fluxo de água, a rede de drenagem, as sub-bacias e diversos outros parâmetros e atributos da área de estudo.

As informações do MDE, junto ao mapa pedológico e de uso e cobertura do solo (UCS) vão compor diferentes unidades de resposta hidrológica (URH). Uma URH consiste em partes da sub-bacia com uma única combinação de relevo, tipo de solo e UCS. Considera-se que o comportamento hidrológico das URHs possa ser explicado por características físicas relacionadas aos solos (e.g. capacidade de armazenamento d'água, profundidade, porosidade, condutividade hidráulica) e à cobertura vegetal (e.g. índice de área foliar, interceptação, profundidade das raízes, albedo, rugosidade) (INPE, 2016). Tais características influenciam em outros componentes do sistema, como a direção de fluxo, área de acumulação, fluxos de base e escoamento (superficial e subsuperficial).

Em quase todas as etapas da simulação hidrológica as ferramentas de um SIG possibilitam não apenas a obtenção e processamento de dados de entrada, mas também a compreensão de cada etapa da simulação deste sistema complexo, uma vez que a informação pode ser espacializada e diferentes dados podem ser sobrepostos, permitindo uma análise integrada.

3.4. USO E COBERTURA DO SOLO (UCS) E O REGIME HIDROLÓGICO

A cobertura vegetal tem um papel fundamental no balanço de energia e no fluxo de volumes de água (TUCCI; CLARK, 1997). Alterações no UCS interferem diretamente nos processos de interceptação, infiltração, evapotranspiração e recarga subterrânea; processos que por sua vez, vão afetar os volumes de escoamento superficial e fluxos bases (BAYER, 2014; NIRAULA; MEIXNER; NORMAN, 2015). De acordo com Calijuri e Cunha (2013), a relações entre florestas e água, incluindo a influencia sobre o escoamento, proteção de mananciais e o eventual efeito sobre a precipitação, bem como seu papel na regulação climática, são antigas, controversas, recorrentes e não totalmente esclarecidas.

A parcela inicial da precipitação interceptada pela vegetação ficará mais ou menos tempo retida em função da densidade e estrutura da cobertura, bem como superfície da folhagem. O processo de interceptação reduz a energia cinética da gota de chuva, favorecendo sua infiltração e reduzindo a erosividade. O impacto da gota de chuva tem energia cinética 256 vezes maior que a energia do escoamento superficial, o que explica a origem de 85% dos sedimentos na erosão hídrica e outros 15% atribuídos ao escoamento superficial (HUDSON, 1995; GUY et al. 1987 *apud* RIBEIRO, 2006).

A porção de água retida na cobertura vegetal pode evaporar parcial ou totalmente. Quando todo o volume retido na vegetação é evaporado, a planta passa a perder água para atmosfera, retirando essa umidade do solo através das raízes, funcionando como “estações elevatórias”, alçando e lançando as águas nas altitudes da atmosfera, águas que mais adiante retornarão ao solo como chuva (NOBRE, 2014). E embora o papel de florestas como “geradoras” de chuva tenha sido, no passado, descartado pela ciência (HEWLET, 1967; PENNMAN, 1963 *apud* CALIJURI; CUNHA, 2013), as evidências científicas recentes demonstram o contrário. Este efeito tem sido comprovado não apenas em grandes extensões de cobertura florestal, como na Amazônia (NOBRE, 2014) mas também pela capacidade das florestas nebulares em “capturar” água das nuvens (POMPEU, 2015; BRUIJNZEEL; SCATENA; HAMILTON, 2010; BRUIJNZEEL; MULLIGAN; SCATENA, 2011).

Em florestas tropicais, a precipitação alcança o solo por atravessar a floresta, em média 85% da precipitação incidente e 1 a 2% escoando sobre folhas e troncos, sendo que aproximados 14% restantes representam a interceptação (TUCCI; CLARK, 1997).

A água que alcança o solo, por sua vez, vai infiltrar ou escoar na superfície e subsuperfície. Em geral, solos cobertos por florestas possuem altas taxas de infiltração por favorecerem o aporte de matéria orgânica e conservar umidade, além de apresentarem alta macroporosidade, que constitui o caminho preferencial da água, facilitando a infiltração e recarga de aquíferos (McCULLOCH; ROBINSON, 1993; CHENG; LIN; LU, 2002; BEST et al. 2003). Bruijnzeel (1988) aponta que a profundidade do sistema radicular da cobertura vegetal define a água disponível para a evapotranspiração, constituindo-se em uma das referências para o balanço hídrico em modelos. A evapotranspiração das florestas é maior que qualquer outra cobertura e explica o aumento das vazões quando se remove a cobertura florestal (ANDREÁSSIAN, 2004; ZHANG et al. 2007). As florestas, especialmente as formações nativas, possuem funções eco-hidrológicas em diferentes posições do relevo: contribuem para a recarga de aquíferos (topos de morros); reduzem o escoamento superficial e promovem a contenção de processos erosivos (nas encostas); protegem os corpos d'água do excesso de sedimentos e contaminantes (áreas ripárias) e atuam como elementos auxiliares em todas essas funções (nos intervales) (TAMBOSI et al., 2015). As florestas exercem também a função de estabilizar as vertentes formadoras de nascentes, aumentando a infiltração e reduzindo a erosão hídrica (CASTRO et al. 1999).

Solos sob uso agropecuário apresentam diferentes taxas de infiltração a depender do tipo de manejo, sendo que o cultivo mínimo apresenta as maiores taxas (BARCELOS; CASSOL; DENARDIN, 1999). Solos agrícolas sob manejo convencional, sem cobertura ou sob pastoreio intensivo e sendo ausentes as medidas de proteção de solo, tendem a ser compactados e portanto, possuem reduzidas taxas de infiltração (LANZANOVA, 2007; KLEIN; KLEIN, 2014).

Uma gama de trabalhos de revisão reunindo diversos estudos conduzidos em bacias pareadas tem sido publicada desde o início do século XX. Destes, destaca-se Bruijnzeel (1990), Bosch; Hewleet (1982); Best et al. (2003); Andreássian (2004) . Tais estudos têm demonstrado que a redução da área florestada resulta em incremento da vazão, embora a magnitude desse aumento seja variável (BOSCH; HEWLEET, 1982; BRUIJNZEEL, 1990; BEST et al., 2003). A maior parte destes, no entanto, foi realizada em bacias com área inferior a 1 km², o que dificulta extrapolar os resultados para médias e grandes bacias, com áreas maiores que 10 km². Estas, em geral, possuem heterogeneidade de atributos físicos como geologia, pedologia e relevo, além de um mosaico de distintos usos e cobertura do solo (WILK; ANDERSON; PLERMKAMON, 2001 *apud* BAYER; COLLISCHON, 2013).

Embora haja consenso sobre o aumento da vazão após a remoção da cobertura florestal, é preciso fazer a distinção entre o efeito do desmatamento sobre a produção total de água da bacia e a distribuição sazonal dos fluxos (BRUIJNZEEL, 1988 *apud* TEIXEIRA, 2015). O aumento da vazão decorre da redução dos processos de interceptação, infiltração e evapotranspiração; em outras palavras, seria a água "consumida pela floresta". No entanto, esta maior "disponibilidade" de água não estaria garantida ao longo das estações, uma vez que a manutenção do fluxo da estação seca depende da recarga de água no solo suficiente durante a estação chuvosa (BRUIJNZEEL, 2004). Menezes et al. (2009) verificaram que o uso do solo teve influência na vazão de nascentes localizadas sob floresta e pastagem em Cambissolo na região da Mantiqueira, Minas Gerais, Brasil. A nascente sob pastagem apresentou depleção no período seco, chegando a vazão quase nula, enquanto que a nascente sob floresta manteve-se produtiva mesmo durante longo período seco.

De acordo Ranzini et al. (2004; 2011) a produção de água de uma microbacia florestada se dá por dois processos: o escoamento superficial, que é água que sai da bacia durante e imediatamente após a chuva e o escoamento de base, oriundo do processo de infiltração, que alimenta o lençol freático e alcança os cursos d'água. A Figura 1 ilustra o efeito da fragmentação florestal nos processos hidrológicos.

Estudos conduzidos em bacias de climas temperado e tropical indicam que a superfície de infiltração e a evapotranspiração, dependentes das características da cobertura de solo que sucede a conversão florestal, desempenham papel fundamental na determinação do regime de fluxo após a remoção da cobertura florestal (BEST et al. 2003). Bacias agrícolas apresentaram aumento do fluxo de base quando comparadas a bacias florestadas, devido a adoção de técnicas de manejo e conservação de solo e água, que favoreceram a infiltração (BLACK; EDWARDS, 1979 *apud* BRUINJZELL, 1990). Assim, quando as taxas de infiltração de superfície são mantidas e a evapotranspiração é reduzida pela remoção da floresta, verifica-se o aumento do fluxo de base (BRUINJZELL, 1990). O contrário se faz verdade, quando as oportunidades de infiltração são reduzidas, no caso de conversão florestal para áreas agrícolas (sem manejo conservacionista) ou urbanas; tem-se redução da infiltração e portanto, não há aumento dos fluxos de base (BRUINJZELL, 1990).

Entende-se, por fim, como mera função hidrológica relativa ao deflúvio, que as florestas reduzem o rendimento hídrico de uma bacia e em contrapartida, favorecem a

infiltração e armazenamento de água no solo, resultando na perenidade dos recursos hídricos (SALEMI et al. 2011).

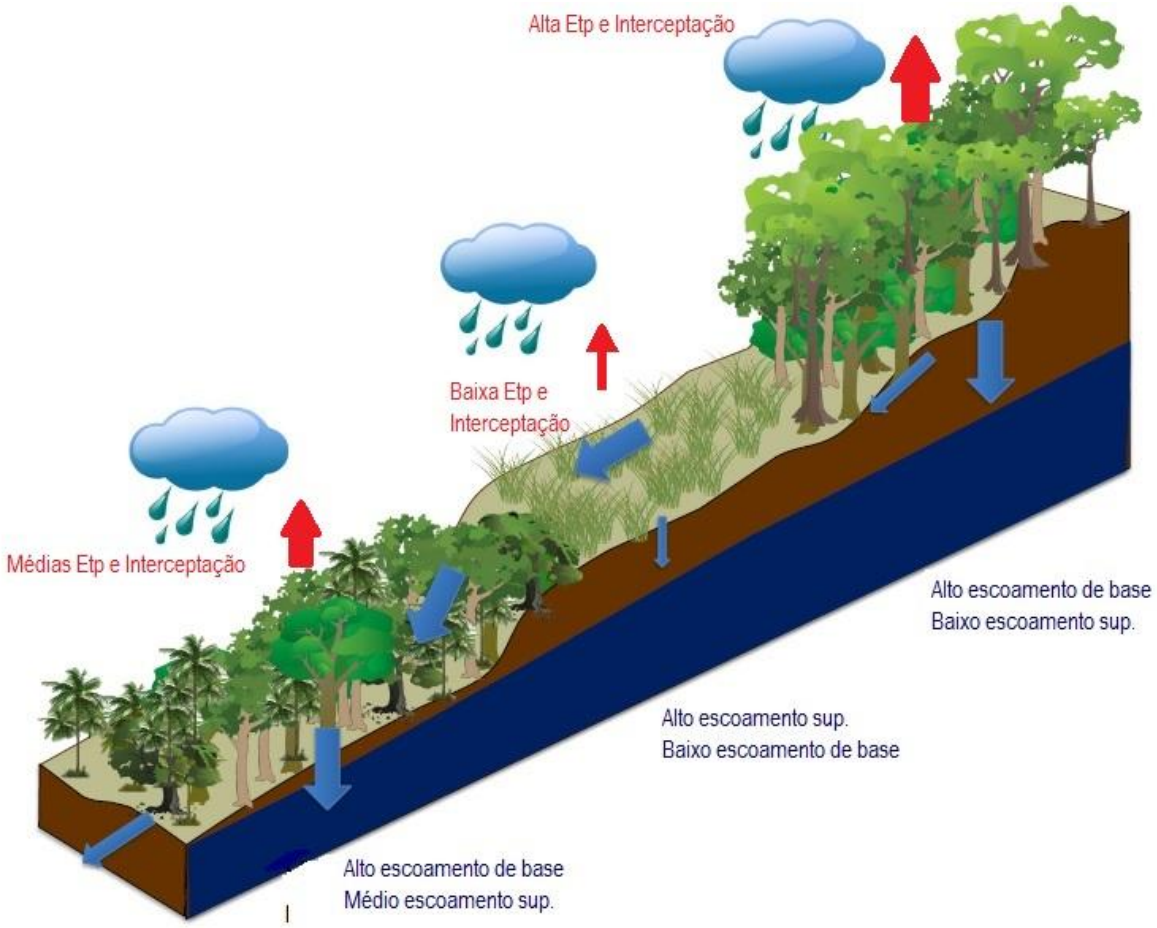


Figura 1 – Efeito da fragmentação florestal nos processos hidrológicos ao longo de uma encosta.
Fonte: Adaptado de Tomasela (2014).

3.5. ÁREAS DE PRESERVAÇÃO PERMANENTE: ASPECTOS LEGAIS E MAPEAMENTO EM UM SIG

As Áreas de Proteção Permanente (APPs), embora definidas pelo Novo Código Florestal - Lei 12.651/2012 (BRASIL, 2012), são espaços vulneráveis, uma vez que "compartilham" o território com a agropecuária, urbanização e áreas industriais; o que as torna, muitas vezes, completamente descaracterizadas de sua condição original, não exercendo suas funções fundamentais de

> "(...) *preservar os recursos hídricos, a paisagem, a estabilidade geológica e a biodiversidade, facilitar o fluxo gênico de fauna e flora, proteger o solo e assegurar o bem-estar das populações humanas*" (BRASIL, 2012).

O art. 4º do Código Florestal, Lei 12.651/2012, estabelece alguns critérios que definem as áreas de preservação permanente e para fins deste trabalho, destaca-se:

> *I - as faixas marginais de qualquer curso d'água natural perene e intermitente, excluídos os efêmeros,* ***desde a borda da calha do leito regular****, em largura mínima de:*
>
> *a) 30 (trinta) metros, para os cursos d'água de menos de 10 (dez) metros de largura;*
>
> *b) 50 (cinquenta) metros, para os cursos d'água que tenham de 10 (dez) a 50 (cinquenta) metros de largura;*
>
> *(...) IV - as áreas no entorno das nascentes e dos olhos d'água perenes, qualquer que seja sua situação topográfica, no raio mínimo de 50 (cinquenta) metros;*
>
> *V - as encostas ou partes destas com declividade superior a 45°, equivalente a 100% (cem por cento) na linha de maior declive;*
>
> *(...) IX - no topo de morros, montes, montanhas e serras,* ***com altura mínima de 100 (cem) metros e inclinação média maior que 25°****, as áreas delimitadas a partir da curva de nível correspondente a 2/3 (dois terços) da altura mínima da elevação sempre em relação à base, sendo esta definida pelo plano horizontal determinado por planície ou espelho d'água adjacente ou, nos relevos ondulados, pela cota do ponto de sela mais próximo da elevação (BRASIL, 2012).* (grifo nosso)

Anteriormente a referida lei, as Áreas de Preservação Permanente consideradas neste trabalho eram definidas pela Resolução CONAMA 303/2002, Art. 2º e Art. 3º:

> *"Art. 2o Para os efeitos desta Resolução, são adotadas as seguintes definições:*
>
> *IV - morro: elevação do terreno com cota do topo em relação a base entre cinqüenta e trezentos metros e encostas com declividade superior a trinta por cento (aproximadamente dezessete graus) na linha de maior declividade;*
>
> *V - montanha: elevação do terreno com cota em relação a base superior a trezentos metros;*
>
> *VI - base de morro ou montanha: plano horizontal defi nido por planície ou superfície de lençol d`água adjacente ou, nos relevos ondulados, pela cota da depressão mais baixa ao seu redor;*
>
> *VII - linha de cumeada: linha que une os pontos mais altos de uma seqüência de morros ou de montanhas, constituindo-se no divisor de águas;*
>
> *(...)Art. 3º- Constitui Área de Preservação Permanente a área situada:*
>
> *I - em faixa marginal,* ***medida a partir do nível mais alto****, em projeção horizontal, com largura mínima, de:*
>
> *a) trinta metros, para o curso d'água com menos de dez metros de largura;*
>
> *b) cinqüenta metros, para o curso d'água com dez a cinqüenta metros de largura (...)*
>
> *V - no topo de morros e montanhas,* ***em áreas delimitadas a partir da curva de nível correspondente a dois terços da altura mínima da elevação em relação a base****."*
>
> (grifo nosso)

No que tange a possível conflito de normas que disciplinam o mesmo tema, é importante salientar que a Lei 12.651/2012 reduziu critérios de proteção ao ambiente em relação a Resolução CONAMA 303/2002, especialmente sobre a medida da calha do rio e topos de morro, tópicos grifados nas definições.

O enunciado do "princípio ambiental da vedação ao retrocesso ecológico" proíbe o recuo dos patamares legais de preservação ambiental, salvo em situações calamitosas, e, das garantias advindas de avanços consolidados, por quaisquer gerações que sobrevenham (AMADO, 2014). Tal princípio coaduna com à base do ordenamento jurídico brasileiro, em conformidade com o qual todas as regras do Direito devem estar.

Todavia, o suposto conflito entre a Resolução CONAMA 303/2002 e a Lei Federal 12.651/2012 é apenas aparente, haja vista o fato de que, segundo ordenamento jurídico, esta prefere àquela, na medida em que na hierarquia das normas uma Lei Federal se sobrepõe a Resolução, ocorrendo neste caso, a chamada revogação tácita da norma anterior.

Em razão disto, embora exista a afronta ao "princípio ambiental da vedação ao retrocesso ecológico", que seria majoritário a resoluções e leis e pareceres jurídicos que questionam a constitucionalidade de diversos dispositivos da Lei 12.651/2012 (AGENCIA SENADO, 2013), a mesma permanece vigente.

As principais perdas ambientais advindas da nova lei são a redução das áreas protegidas nos topos de morro, que de acordo com mapeamentos, chega a 87% considerando todo território nacional (SOARES-FILHO et al. 2014); assim como nas margens dos rios, uma vez que a lei vigente considera a calha regular do rio e não mais o leito mais alto. A anistia aos desmatamentos ocorridos antes de 2008 foi também considerada um retrocesso ambiental.

Oliveira e Fernandes-Filho (2016), sobre as definições de APP de topos de morro, destacam ao menos duas falhas técnicas do Novo Código Florestal: a subjetividade no cálculo da declividade e a indefinição de que escala deve ser feita o mapeamento, o que interfere diretamente na obtenção dos pontos de sela.

A necessidade de uma lei florestal mais moderna, com definições claras e práticas era evidente; entretanto, tais mudanças não consideraram aspectos técnicos fundamentais e trouxeram perdas ambientais que interferem em processos hidrológicos, proteção do solo e conservação da biodiversidade; além de serem incompatíveis com acordos internacionais para

conter o aquecimento global, sendo o mais recente deles, o Acordo de Paris, ratificado pelo Brasil em setembro de 2016 (ONU, 2016).

O mapeamento de Áreas de Preservação Permanente de forma automatizada pelas ferramentas de um SIG é cada vez mais utilizado, considerando aspectos agilidade e qualidade do mapeamento, especialmente quando se deseja trabalhar com grandes áreas tal (CARREGA; CAMPOS; BARROS, 2011; LORENZON et al., 2014). Há que se considerar, no entanto, a resolução espacial do dado de entrada, em geral, um modelo digital de elevação ou cartas altimétricas; bem como a finalidade do mapeamento, que pode demandar dados mais ou menos detalhados. Cota e Moura (2009) levantam a importância da escala do mapeamento já que diferentes produtos orbitais correspondem a diferentes escalas e, por sua vez, podem gerar resultados distintos para a mesma área de estudo.

As APP de topo de morro e montanha definidas pela Resolução CONAMA 303/2002 eram objeto de divergências jurídicas e técnicas, devido a dificuldade em materializar, em termos de mapeamento, uma vez que a lei privilegia o reconhecimento em campo (HOTT; GUIMARÃES; MIRANDA, 2005; OLIVEIRA; FERNANDES FILHO, 2013) especialmente no que diz respeito a definição da base do morro. De acordo com a referida lei, é possível considerar três diferentes referências como base: o ponto de sela, a cota mais baixa da delimitação hidrológica do morro ou o curso d'água mais próximo. Critérios tais que podem ser equivalentes, em certos casos; mas que em geral, são divergentes e resultam em áreas distintas, já que a diferença de cota entre a base e o topo do morro define as áreas de proteção.

A definição geométrica de "ponto de sela" aplicada às superfícies de relevo é dada por Cortizo (2007) como parte deprimida do relevo de uma crista montanhosa, utilizada como passagem de uma vertente a outra, entendendo por isso, pontos específicos do terreno, definidos pela sua topografia com precisão matemática, definição empregada também por Cunha et al. (2015). Já a delimitação hidrológica de um morro resulta de mapeamentos que utilizam a técnica do MDE invertido, sendo os topos identificados como depressões. Para cada depressão, identifica-se a respectiva área de contribuição, com base na direção de fluxo, cuja menor cota deste contorno representa a base do morro (RIBEIRO et al., 2005), o que já foi utilizado também por outros autores como Nowatzk; Santos; Paula (2010). A terceira e última possível definição seria o espelho d'água mais próximo ao topo do morro. Esta, embora empregada por Koumrouyan (2015) e pelo Ministério Público de São Paulo (MPSP, 2012), é questionada por Cortizo (2007) por não serem os cursos d'água superfícies planas, o que seria uma incoerência do ponto de vista das definições presentes na resolução.

4. METODOLOGIA

O desenvolvimento deste trabalho pode ser resumido em duas etapas que adiante se complementam: o mapeamento das APP e a Modelagem Hidrológica. Realizou-se primeiramente o levantamento e processamento da base dados; que envolveu o mapeamento das Áreas de Preservação Permanente, a obtenção dos mapas de uso do solo e mapa de solos, o delineamento dos cenários de uso e a aquisição dos dados hidrometeorológicos. E posteriormente, a simulação hidrológica, que utilizou os dados previamente processados no SIG. A Figura 2 apresenta um fluxograma que resume a metodologia.

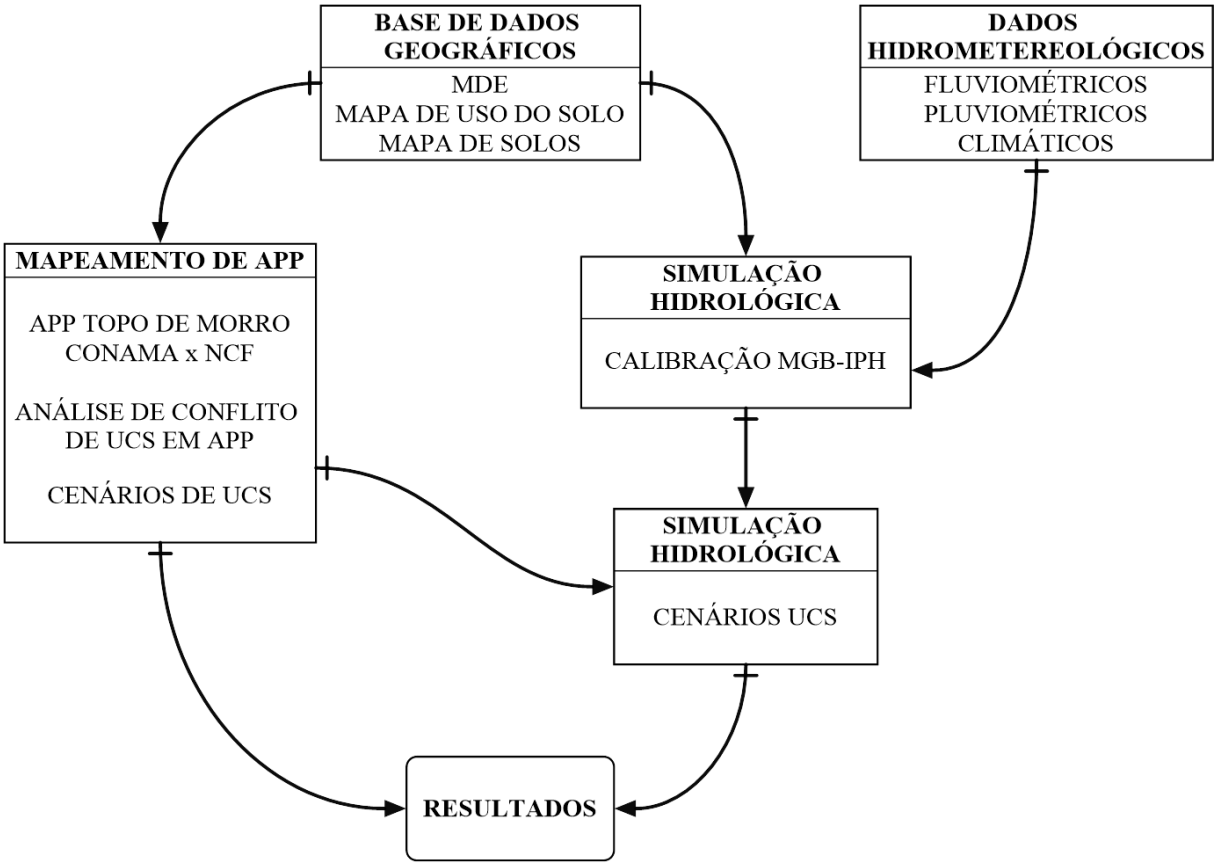


Figura 2 – Resumo da metodologia completa.

Apresenta-se, na sequencia, a descrição área de estudo e do modelo hidrológico adotado. Os itens seguintes descrevem as demais etapas deste trabalho, fonte de dados e programas utilizados.

4.1. CARACTERIZAÇÃO FISIOGRÁFICA DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo corresponde à bacia do rio Sapucaí, que possui uma área de drenagem de 9.271 km². O rio Sapucaí é afluente da margem esquerda do rio Grande que, por sua vez, faz parte da bacia do rio Paraná.

O rio Sapucaí tem sua nascente na Serra da Mantiqueira, no município de Campos do Jordão, estado de São Paulo, a 1620 m de altitude e tem sua foz na Represa de Furnas, entre os municípios de Elói Mendes e Paraguaçu, no estado de Minas Gerais, a 780 m. de altitude (COPASA, 2010), conforme Figura 3 que apresenta a localização da bacia. Os principais tributários são os rios Sapucaí-Mirim, Lourenço Velho, Itaim, Ribeirão do Mandu, Rio do Cervo, Rio Turvo e Rio Dourado (IGAM, 2015b). A bacia do rio Sapucaí abrange 51 municípios, sendo 3 no estado de São Paulo e 48 em Minas Gerais apresentados na Figura 4.

A bacia insere-se no Domínio Fitogeográfico da Mata Atlântica (OLIVEIRA-FILHO; FONTES, 2000), apresentando remanescentes das fisionomias florestais denominadas Floresta Ombrófila, na região de cabeceira, junto a Serra da Mantiqueira; Florestas Estacionais Semidecíduas nas encostas íngremes e montanhas mais distantes da serra e por fim, as Matas Ciliares, que acompanham os cursos d'água. O uso do solo predominante é a agropecuária, sendo que na região da Mantiqueira predominam a pecuária de leite e corte em regime extensivo e semi-extensivo, agricultura "de montanha" (pouco mecanizada), com cafeicultura, bananicultura, *citrus*, entre outras culturas perenes e anuais; na região da foz, próxima a represa de Furnas, o relevo plano e plano-ondulado favorece a mecanização agrícola, onde se encontram em maiores extensões os cultivos anuais de milho, além da cafeicultura e pecuária extensiva. Os tipos de solo predominantes são os Cambissolos nas regiões de maiores altitudes e declives, os Latossolos na áreas de relevo menos acidentado e Neossolos Flúvicos nas margens de cursos d'água e planícies aluviais (CURI et al. 2008).

O clima, segundo a classificação de Köppen e aplicado ao estado de Minas Gerais por Sá Junior (2009) é Cwb no alto Sapucaí, região da Mantiqueira e arredores, onde estão as maiores altitudes e Cwa na região do médio e baixo Sapucaí. Cwb é o clima temperado úmido com inverno seco, precipitação média inferior a 60 mm em pelo menos um dos meses desta estação e verão moderadamente quente, com temperatura média do mês mais quente inferior a 22ºC. Cwa é o clima temperado úmido com inverno seco, com condições de precipitação

iguais ao anterior, diferindo-se deste no verão, que é quente e apresenta temperatura média do mês mais quente superior a 22ºC.

Com relação ao uso da água, o abastecimento público, irrigação, mineração e uso industrial são os principais usos consuntivos (COPASA, 2010).

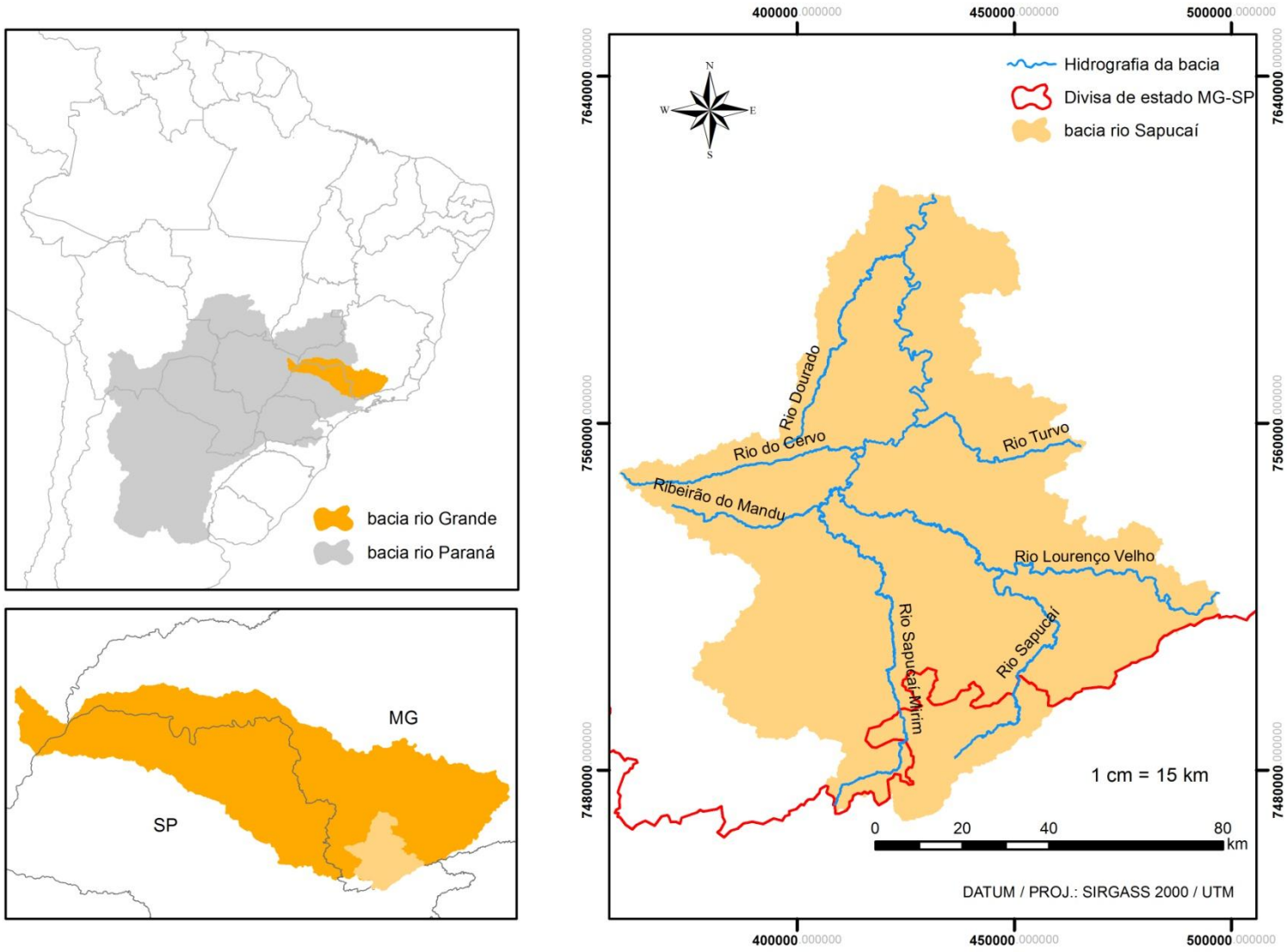


Figura 3 – Localização da bacia do Sapucaí no contexto da bacia do rio Grande e Paraná. Fonte da base de dados: MMA, 2016; IGAM, 2015b.

NÚMERO	MUNICÍPIO
1	SANTO ANTONIO DO PINHAL
2	SAPUCAÍ-MIRIM
3	CAMANDUCAIA
4	GONÇALVES
5	CAMPOS DO JORDÃO
6	MUNHOZ
7	SAO BENTO DO SAPUCAÍ
8	CORREGO DO BOM JESUS
9	SENADOR AMARAL
10	CAMBUI
11	WENCESLAU BRAZ
12	PARAISOPOLIS
13	CONSOLACAO
14	PIRANGUÇU
15	MARMELÓPOLIS
16	CONCEIÇÃO DOS OUROS
17	DELFIM MOREIRA
18	ESTIVA
19	ITAJUBÁ
20	BRASÓPOLIS
21	PASSA QUATRO
22	PIRANGUINHO
23	CACHOEIRA DE MINAS
24	SAO JOSE DO ALEGRE
25	MARIA DA FÉ
26	VIRGINIA
27	PEDRALVA
28	SANTA RITA DO SAPUCAÍ
29	BORDA DA MATA
30	OURO FINO
31	POUSO ALEGRE
32	SAO SEBASTIAO DA BELA VISTA
33	SENADOR JOSE BENTO
34	CONCEIÇÃO DAS PEDRAS
35	NATÉRCIA
36	CONGONHAL
37	HELIODORA
38	CAREACU
39	SILVIANÓPOLIS
40	LAMBARI
41	SAO JOÃO DA MATA
42	ESPÍRITO SANTO DO DOURADO
43	SAO GONÇALO DO SAPUCAÍ
44	TURVOLANDIA
45	CARVALHOPOLIS
46	POCO FUNDO
47	CORDISLÂNDIA
48	MONSENHOR PAULO
49	MACHADO
50	ELOI MENDES
51	PARAGUAÇU

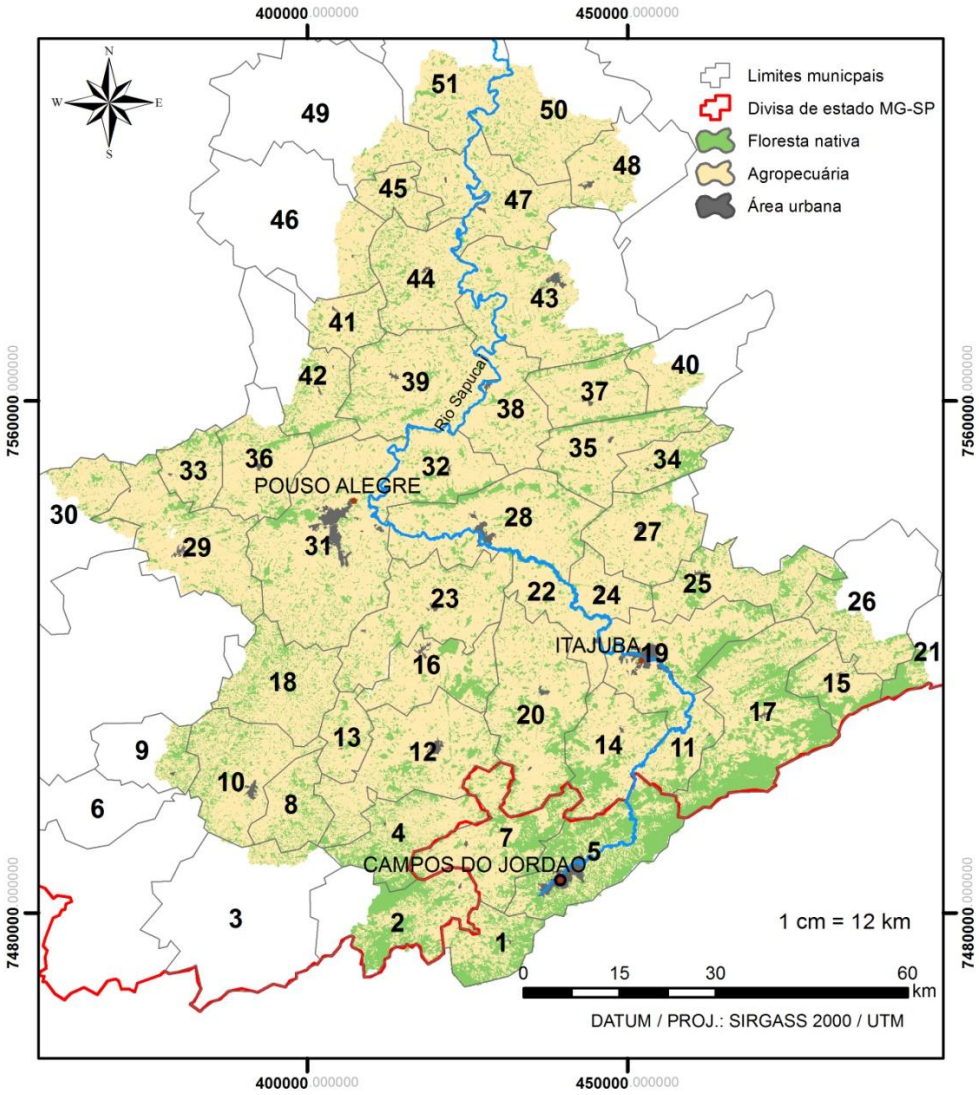


Figura 4 - Municípios que compõem a bacia do rio Sapucaí. Fonte da base de dados: IBGE (2016), LEMAF/UFLA (dados não publicados).

4.2. O MODELO DE GRANDES BACIAS (MGB-IPH)

Para a simulação hidrológica da bacia, optou-se pela utilização do Modelo de Grandes Bacias do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (MGB-IPH), um modelo distribuído desenvolvido para simular processos hidrológicos em bacias de grande escala, capaz de representar a distribuição espacial destes processos, bem como a influência da vegetação nas bacias (COLLISCHONN; TUCCI, 2001).

Na etapa de discretização, a bacia é subdividida em unidades menores denominadas minibacias que podem variar em quantidade de 10 a 10 mil, interligadas pela rede de drenagem, considerando um único canal de escoamento (FAN et al., 2010). Cada minibacia é dividida em Unidades de Resposta Hidrológica (URH), também chamadas de blocos, o que considera a variabilidade física dos processos, embora não considere a localização de cada bloco dentro da minibacia. As URHs, em inglês, "*groundwater response unit*" (GRU) resultam da combinação de características de uso do solo, cobertura vegetal e os tipos de solo, conforme Figura 5. Cada URH/GRU possui parâmetros associados que determinam os processos de geração de escoamento.

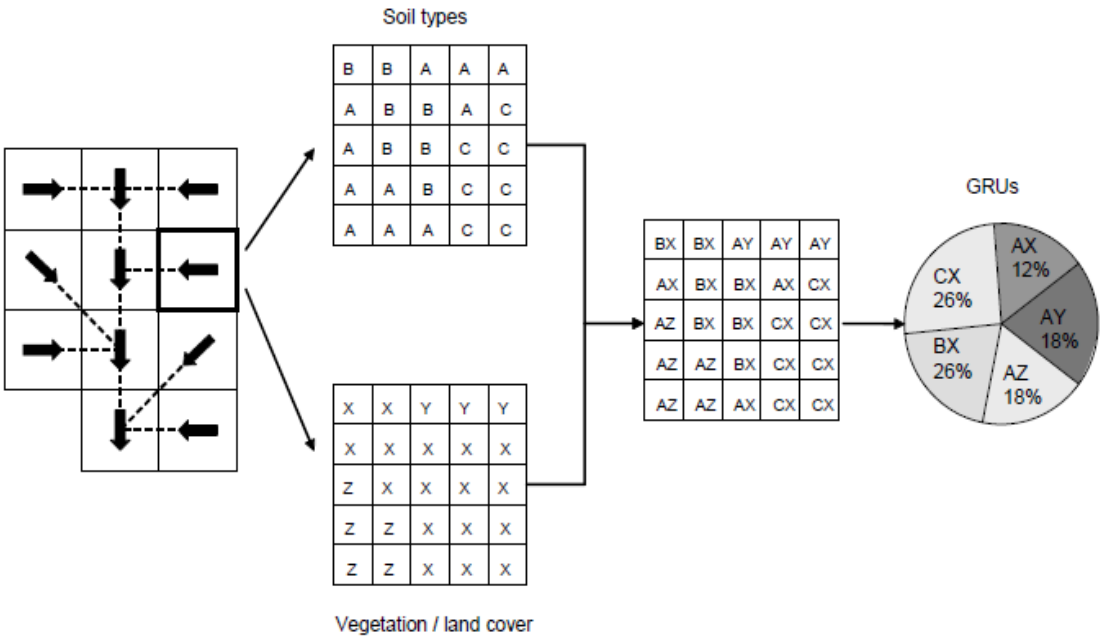


Figura 5 – Discretização da bacia a partir da combinação de uso e cobertura do solo e tipos de solo, formando as Unidades de Resposta Hidrológica (URH/GRU).
Fonte: INPE, 2016.

Os processos representados no MGB-IPH são: interceptação, balanço de água no solo; evapotranspiração; escoamentos superficiais, subsuperficiais e subterrâneos nas minibacias e escoamento na rede de drenagem. A bacia hidrográfica é dividida em minibacias,

que são agrupadas em sub-bacias. Às minibacias são atribuídas informações como: URH a que estão associadas, dados de precipitação, de temperatura do ar, de umidade relativa, de velocidade do vento, de insolação e de pressão atmosférica (BAYER; COLLISCHONN, 2014).

A simulação dos processos de interceptação, evapotranspiração, geração de escoamento e o balanço de água no solo ocorre de forma independente, em cada URH dentro de uma minibacia. A interceptação, os escoamentos superficial, sub-superficial e subterrâneo são representados como reservatórios, em que o volume depende de parâmetros associados ao processo; *e. g.* o Índice de Área Foliar (IAF) é um parâmetro que determina o volume do reservatório da interceptação. Coberturas vegetais mais densas, como florestas, possuem maior IAF e, por isso, tem maior capacidade em reter a água da chuva. Portanto, URH com cobertura florestal são representadas por um reservatório de maior volume. Assim, os escoamentos resultantes de todas URHs em uma minibacia são somados e armazenados em diferentes reservatórios de acordo com sua natureza superficial, sub-superficial e subterrânea (FÉLIX; PAZ, 2016). Um reservatório linear simples simula o aporte de cada tipo de escoamento gerado na célula até a rede de drenagem e o escoamento ao longo da rede de drenagem é propagado até a célula de jusante ao longo do trecho de rio que conecta as duas células (FÉLIX; PAZ, 2016).

A evapotranspiração é calculada pelo método de Penman-Monteith, aplicando-se separadamente, à lâmina de água interceptada e à água de camada superficial do solo (COLLISCHONN, 2001).

As variáveis precipitação, temperatura, umidade relativa, insolação, velocidade do vento e pressão atmosférica em uma célula são obtidas por interpolação dos postos com dados mais próximos. A função interpoladora utilizada é o Inverso da Distância ao Quadrado (COLLISCHONN, TUCCI, 2001).

Os parâmetros do modelo com maior influência do uso do solo, Índice de área foliar (*IAF*), albedo (*a*), altura média da vegetação (*h*) e resistência superficial (r_s), foram avaliados em análises de sensibilidade por Collischonn (2001); Caram (2011) e Bayer (2014), mostrando que as vazões médias calculadas pelo modelo dependem dos parâmetros relacionados a vegetação. Estes parâmetros estão descritos a seguir.

O **índice de área foliar da vegetação (IAF)** expressa a interceptação, que é dependente do tipo de cobertura do solo. Determinado pela razão entre a área foliar das

plantas e a unidade de superfície projetada no solo (m^2/m^2). Constitui-se em variável biofísica diretamente relacionada com a evapotranspiração e a produtividade vegetal.

Em culturas agrícolas o IAF pode estar próximo a zero, nas épocas de preparo do solo ou alcançar os máximos, no ápice da produtividade de cada cultura; assim como existe a variação sazonal em áreas de cerrado e florestas decíduas. Esta variabilidade é considerada no modelo, atribuindo-se valores de IAF mensais a cada bloco (CARAM, 2010).

Albedo é o coeficiente de reflexão da superfície, e condiciona a energia líquida disponibilizada para o fluxo de calor latente, contabilizada pelo saldo de radiação (VIOLA, 2011). Quanto menor o **albedo**, menor é a parcela de radiação eletromagnética refletida e maior a energia disponível para evapotranspiração.

A **Altura da vegetação (h)** determina a parcela de água interceptada ou a porção de água de chuva retida na vegetação. No modelo é simulada como um reservatório cuja capacidade máxima depende da cobertura vegetal, mais especificamente, do IAF e da lâmina de água interceptada (BAYER; COLLISCHONN, 2013).

A **Resistência superficial (r_s)** é o parâmetro que representa a transferência do fluxo de água do solo para a atmosfera através das plantas (BAYER, 2014); e por isso, controla a evapotranspiração. Esse fluxo ascendente de água é controlado pela abertura e fechamento dos estômatos sendo, portanto, uma resistência fisiológica (CALDER, 1993); mas altamente dependente das condições de umidade do solo, temperatura e radiação incidente. Quanto maior a resistência, menor a transpiração vegetal. Em condições favoráveis de umidade do solo, os valores de $\mathbf{r_s}$ são mínimos (CARAM, 2011).

De acordo com Collischonn (2001), o desempenho do modelo é avaliado pelas funções objetivo: Coeficiente de Nash (**R2**), Coeficiente de Nash para os logaritmos das vazões ($\mathbf{R_{log}}$) e Relação entre volumes medidos e calculados (**ΔV**). O Coeficiente de Nash (R2) tem valor máximo igual a 1, que corresponde ao melhor ajuste entre as vazões observadas e calculadas. É fortemente influenciado por erros na estimativa de vazões máximas. Quanto mais próximo de 1, melhor o ajuste do modelo; o que indica que o modelo simulou bem os eventos de cheia. O desempenho é considerado adequado e bom com valor de **R2** superior a 0,75; aceitável com valor entre 0,36 e 0,75. O valor do Nash logaritmo das vazões ($\mathbf{R_{log}}$), também varia de 0 a 1, e embora seja influenciado pelas vazões máximas, tem mais relação com as vazões mínimas. Valores próximos a 1 indicam que o modelo simulou bem os períodos de recessão e as estiagens. A Relação entre volumes (**ΔV)** ou erro de volume

não possui valor máximo ou mínimo; expressa a diferença relativa entre a soma de todas as vazões observadas e calculadas. É uma função adequada para verificar se as perdas de água por evapotranspiração estão sendo corretamente calculadas. Quanto mais próximo de zero o Δ**V,** melhor o ajuste do modelo.

4.3. DADOS DE ENTRADA PARA O MODELO E PROGRAMAS UTILIZADOS

Utilizou-se um modelo digital de elevação (MDE) com resolução espacial de 90 m obtido da missão SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) (USGS, 2016) para a fase inicial da pesquisa que envolveu a determinação das áreas de drenagem acumuladas, direção de fluxo das células, rede de drenagem, comprimento e declividade de trechos de rios, delimitação da bacia, sub-bacias e rede de drenagem. Estas etapas foram desenvolvidas no software ArcGis 10.4 (ESRI, 2015), com a extensão "*ArcHidroTools*".

A área de estudo delimitada sobre o Modelo Digital de Elevação (MDE) ocupa 9.271 km² e abrange toda a bacia do rio Sapucaí (BRS). As altitudes variam de 794 a 2397 m conforme a Figura 6, que apresenta o MDE recortado nos limites da bacia.

Na discretização da bacia, foram considerados 11 postos fluviométricos, selecionados por apresentarem a base de dados mais consistente. A Figura 7 apresenta a bacia segmentada em 11 sub-bacias, a rede hidrográfica principal e os postos fluviométricos considerados neste estudo.

A base de dados para elaboração do Mapa de Uso do Solo foi disponibilizada pela Universidade Federal de Lavras / Departamento de Ciências Florestais/ Laboratório de Estudos e Projetos em Manejo Florestal (UFLA / DCF / LEMAF) em parceria com o Ministério do Meio Ambiente (MMA), elaborada no âmbito do projeto "Mapeamento dos Remanescentes de Vegetação Nativa do Brasil para o Cadastro Ambiental Rural (CAR)". Para o mapeamento foram usadas imagens *Landsat* referentes ao ano de 2008 (sensor *Thematic Mapper-TM* e imagens *RapidEye* referentes ao ano de 2011 (fornecidas pelo Ministério do Meio Ambiente). Para classificação, utilizou-se algoritmos de aprendizagem de máquina e uma abordagem em multi-sensor baseada em objetos (GEOBIA - *Geographic Object-Based Image Analysis*) (comunicação pessoal, dados não publicados). O Mapa de Uso do Solo é apresentado na Figura 9.

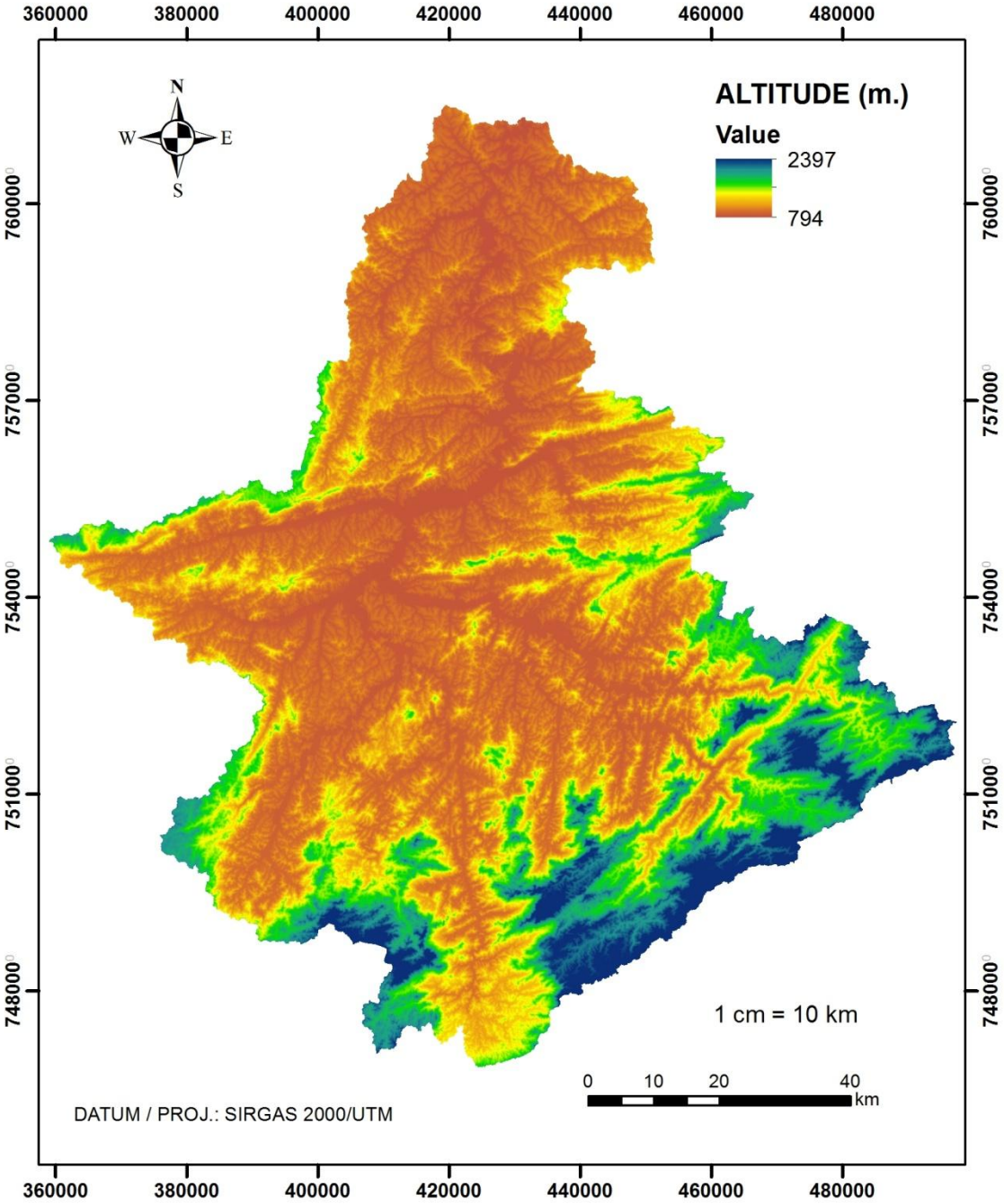
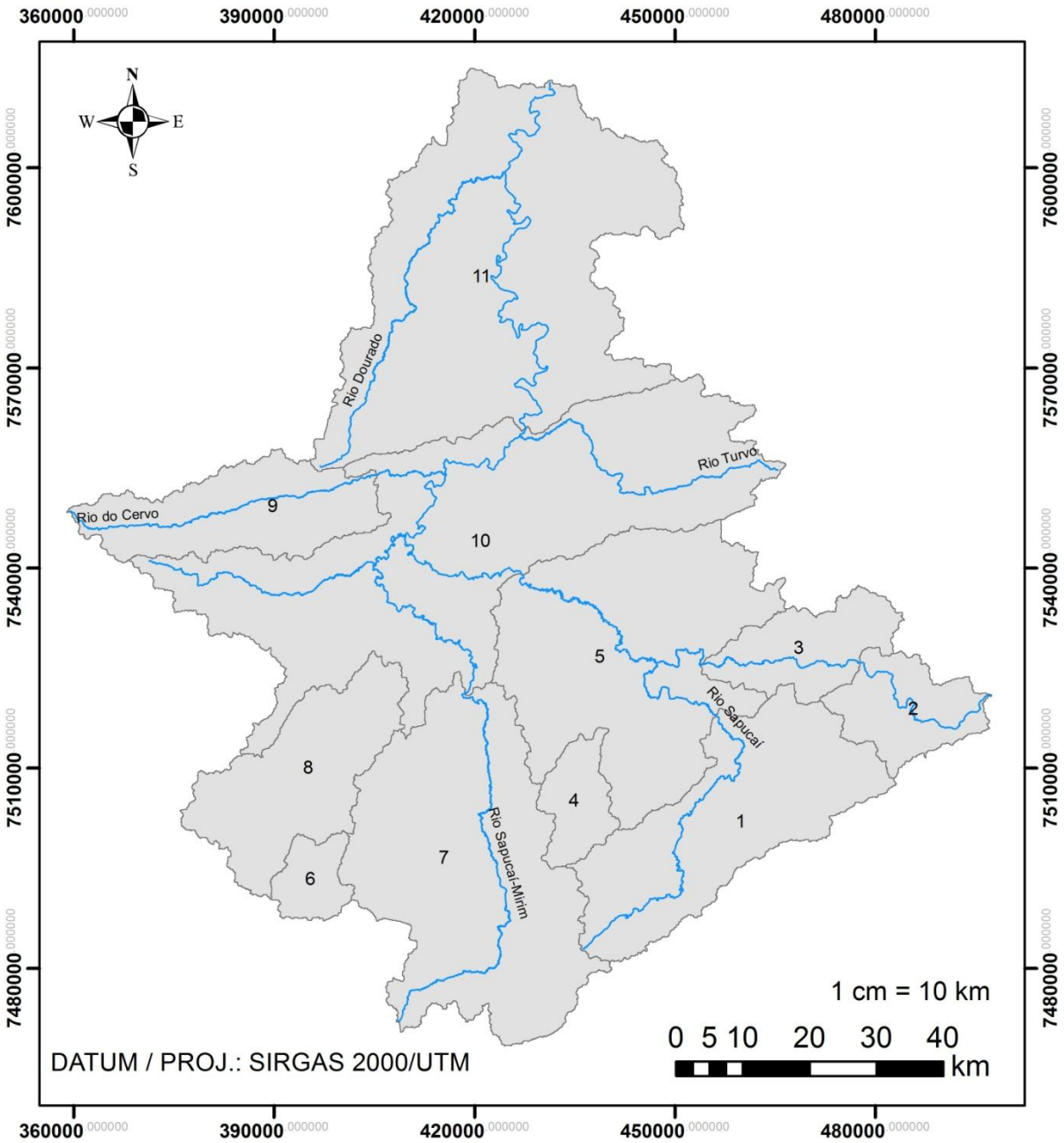


Figura 6 – Modelo digital de elevação (MDE) para a bacia do rio Sapucaí.
Fonte: USGS, 2016.



SUBBACIA	CÓDIGO	NOME ESTAÇÃO	SUBBACIA	CÓDIGO	NOME ESTAÇÃO
1	61271000	São João - Itajubá	7	61360000	Cambuí
2	61280000	Virgínia	8	61370000	Pouso Alegre
3	61285000	Itajubá	9	61390000	Vargem do Cervo
4	61295000	Brazópolis	10	61410000	Careaçu
5	61305000	Santa Rita do Sapucaí	11	61425000	Paraguaçu
6	61350000	Conceição dos Ouros			

Figura 7 – Mapa de sub-bacias, estações fluviométricas e hidrografia principal da bacia. Fonte da base de dados: IGAM (2015).

As classes originais da base de dados foram reagrupadas em quatro classes, a forma mais conveniente para este estudo, sendo: floresta, agropecuária, área urbana e água. Predomina a classe “agropecuária” na bacia, ocupando quase 75% da área de estudo, seguida pela classe “vegetação nativa” com aproximados 23%. As áreas urbanas ocupam 1% e classe “água” 0,36%, ilustrado na Figura 8.

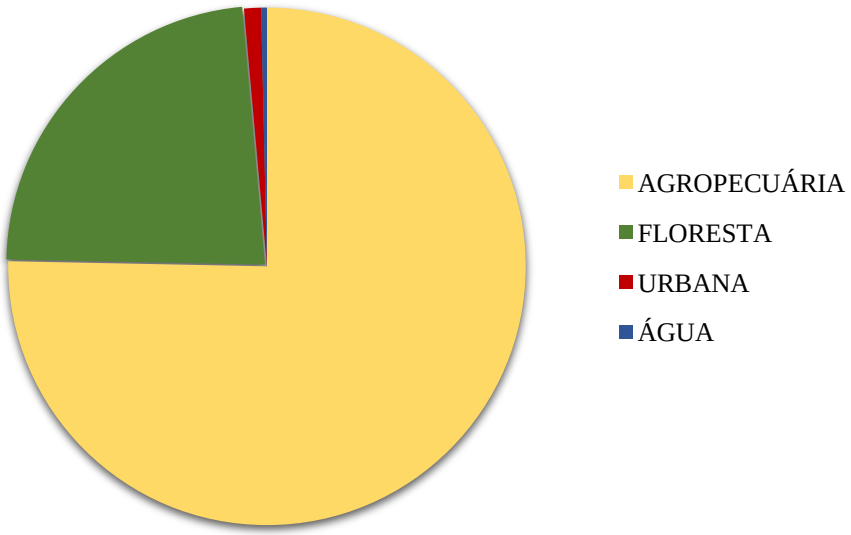


Figura 8 – Uso do solo na bacia do rio Sapucaí em áreas percentuais das classes.

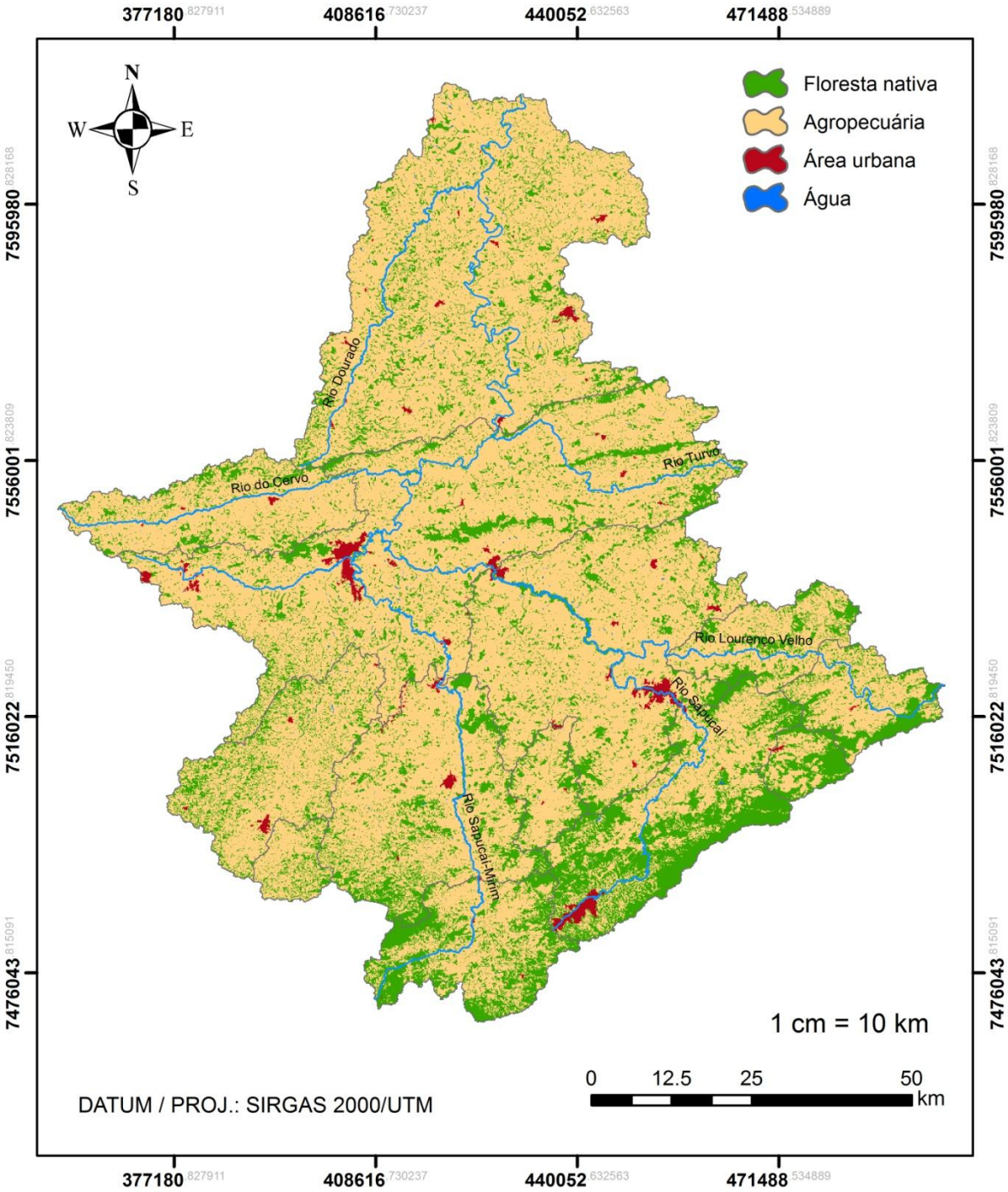


Figura 9 – Mapa de uso e cobertura do solo da bacia do rio Sapucaí.
Fonte da base de dados: IGAM (2015); UFLA/DCF/LEMAF (dados não publicados).

O Mapa de Solos da bacia foi elaborado a partir do cruzamento de informações do Levantamento de Solos do Estado de Minas Gerais (FEAM, 2010), Novo Mapa de Solos do Brasil (SANTOS, 2011) e modelagem gerada pelo algoritmo HAND (INPE, 2012). A base de dados foi processada, basicamente, com o auxílio das ferramentas de recorte (*Clip*), fusão (*Merge*) e criação de mosaico (*Mosaic to New Raster*) do ArcGis 10.3 (ESRI, 2014).

O HAND, sigla para *Height Above de Nearest Drainage*, é uma técnica de processamento de dados altimétricos que realiza normalização topográfica e fornece um modelo digital que classifica o terreno de acordo com as distâncias verticais aos cursos d'água mais próximos (ARASATO; AMARAL; XIMENES, 2009). A primeira classe definida neste estudo e utilizada para compor o mapa de solos, considerou a distância vertical de 0 a 5 m como a zona com menor capacidade de infiltração e, portanto, a maior geradora de escoamento superficial.

Com o mapa de solos da bacia composto, procedeu-se o agrupamento e reclassificação dos tipos de solos segundo seu comportamento hidrológico em quatro classes (A, B, C e D), sendo que a classe A agrupa os solos mais profundos e bem drenados e a classe D agrupa os solos menos drenados e que geram mais escoamento de acordo com Sartori; Lombardi Neto; Genovez (2005). A Figura 10 apresenta a classificação do comportamento hidrológico dos solos na bacia.

O MGB-IPH pode ser utilizado como uma extensão do SIG MapWindow ou pela execução do código em FORTRAN. Realizou-se a preparação dos dados (Pré Pro-MGB), calibração e simulações do modelo.

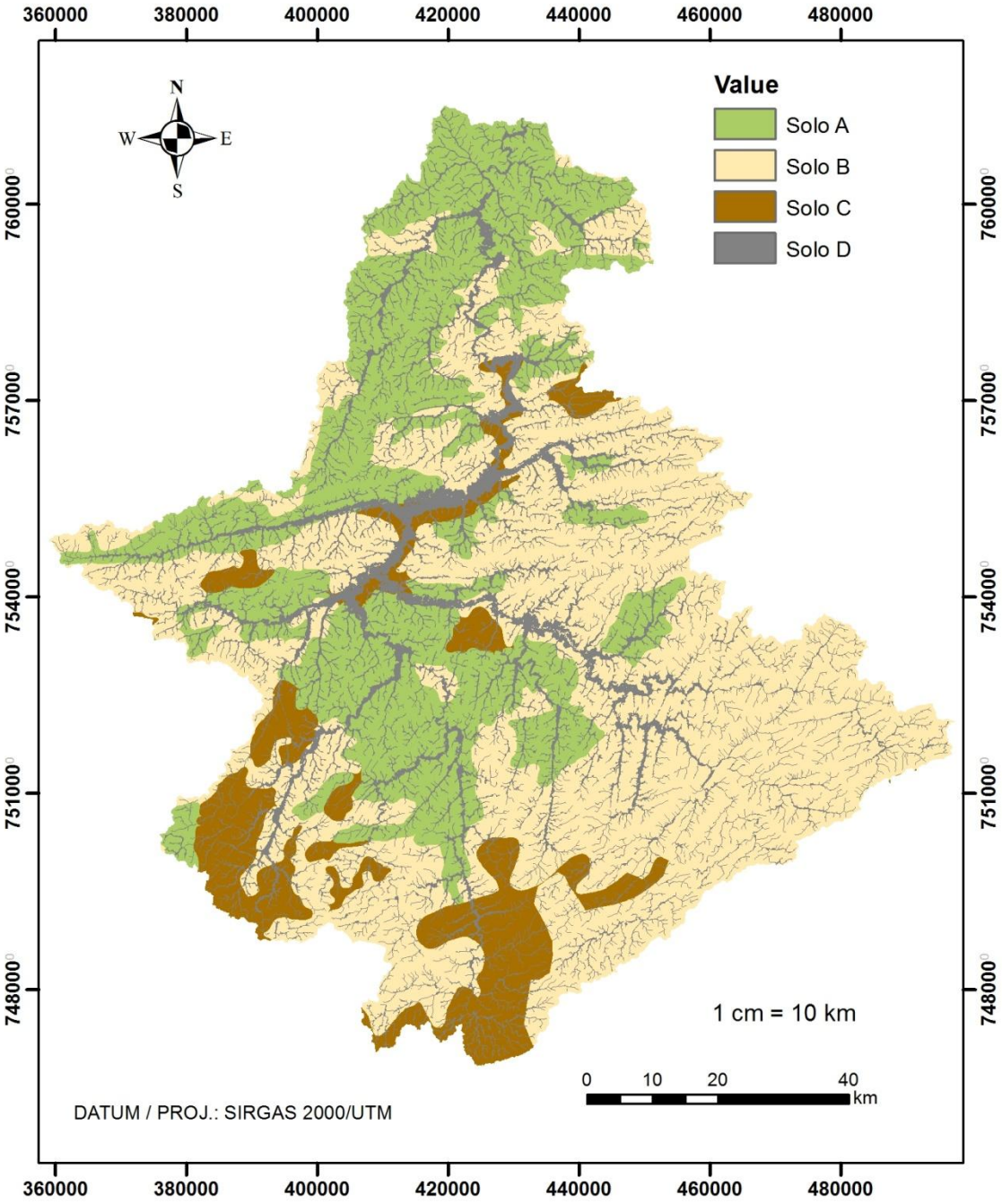


Figura 10 – Classificação do comportamento hidrológico dos solos que ocorrem na bacia.

4.3.1. DADOS HIDROCLIMÁTICOS

Foram levantados os dados de vazão, precipitação, temperatura do ar, umidade relativa do ar, velocidade do vento, pressão atmosférica e radiação solar. O critério de espacialidade dos postos fluviométricos e pluviométricos foi considerado, de maneira que a informação obtida seja coerente com toda a bacia. Dados de vazão e precipitação foram obtidos da plataforma Hidroweb, da Agência Nacional das Águas – ANA (ANA, 2016).

Os dados de vazão foram obtidos de 11 postos fluviométricos listados no Quadro 1 e já foram apresentados na Figura 7, que apresenta o Mapa de Sub-bacias delimitadas pelos postos. Os dados de precipitação foram obtidos de 31 estações pluviométricas, apresentadas na Figura 11.

Quadro 1 - Postos fluviométricos que delimitam as sub-bacias componentes da área de estudo.

CÓD. ESTAÇÃO	SUB-BACIA	ÁREA DRENAGEM (Km²)	RIO/ RIBEIRÃO	NOME DA ESTAÇÃO/MUNICÍPIO
61271000	1	857	Sapucaí	SÃO JOÃO – ITAJUBÁ
61280000	2	268	Lourenço Velho	VIRGÍNIA
61285000	3	554	Lourenço Velho	ITAJUBÁ
61295000	4	156	Vargem Grande	BRAZÓPOLIS
61305000	5	2806	Sapucaí	SANTA RITA SAPUCAÍ
61350000	6	116	Sapucaí-mirim	CONCEIÇÃO DOS OUROS
61360000	7	1332	Itaim	CAMBUÍ
61370000	8	672	Itaim	POUSO ALEGRE
61390000	9	484	Cervo	VARGEM DO CERVO
61410000	10	7320	Sapucaí	CAREAÇU
61425000	11	9271	Sapucaí	PARAGUAÇU

*Área de drenagem recalculada neste estudo e não correspondente às áreas oficiais da ANA.

Fonte: ANA (2016).

Os dados climáticos foram obtidos do Instituto Nacional de Pesquisas Meteorológicas – INMET e para ampliar a abrangência de dados da bacia, incluíram-se estações localizadas fora dos limites geográficos da mesma, mas que representam também as condições climáticas desta. Assim, as estações com dados climatológicos foram: Cambuquira, Lambari, Passa Quatro, Poços de Caldas, São Lourenço, Caxambu, Campos do Jordão, Maria da Fé, Itajubá e Machado. A Figura 11 apresenta o Mapa de Estações Pluviométricas, com respectivo código, e Climatológicas, com respectivo nome da cidade.

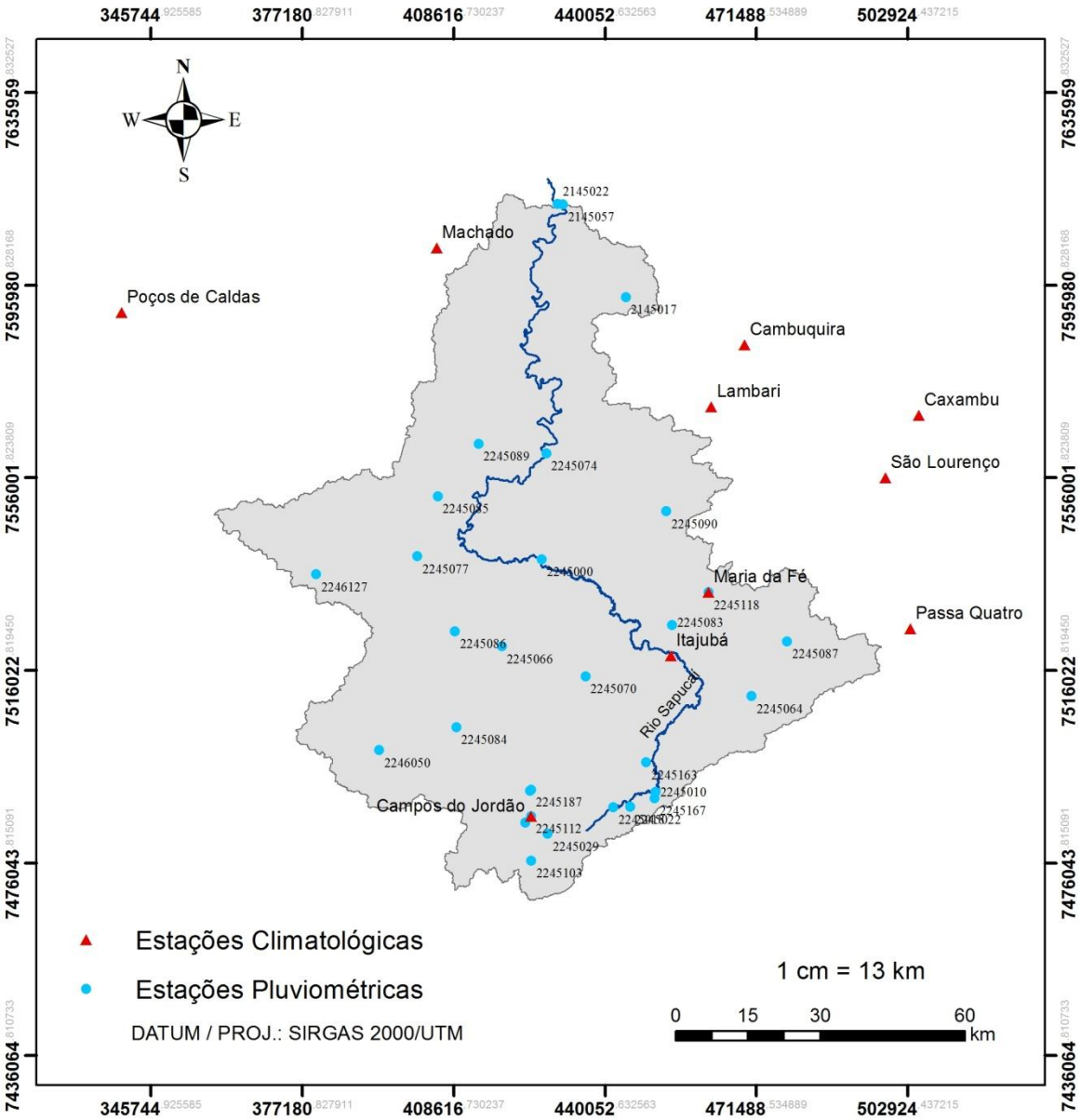


Figura 11 – Mapa de estações pluviométricas e climatológicas.
Fonte: ANA (2016), INMET (2016).

4.4. MAPEAMENTO DE ÁREAS DE PRESERVAÇÃO PERMANENTE (APP)

O mapeamento das APPs foi realizado no ArcGis 10.4 (ESRI, 2015). Para as APPs de curso d'água e de nascentes utilizou-se a ferramenta *buffer* sobre a base dados de drenagem obtida do IBGE, na escala 1:250:000. A ferramenta *buffe*r, também conhecida como "Análise de proximidade" consiste em subdivisões geográficas bidimensionais na forma de faixas, cujos limites externos possuem uma distância "x" e os limites internos são determinados pela forma da expressão gráfica em exame, seja um ponto ou uma linha (PELUZIO; SANTOS; FIEDLER, 2010). A sobreposição de áreas protegidas foi eliminada com o uso das ferramentas "*merge*" e posteriormente, a ferramenta "*dissolve*".

A delimitação das APPs de cabeceira foi realizada a partir da localização de todas as nascentes dentro da bacia e a criação de pontos em formato *shapefile* (shp), sobre a cabeceira de cada drenagem. Sobre esses pontos confeccionou-se o *buffer* com raio de 50 m conforme a definição legal desta categoria de APP, em ambas as referências legais.

A mesma técnica foi utilizada para delimitar as APPs no entorno da rede de drenagem. Considerando que a bacia possui cursos d'água com larguras inferiores e superiores a 10 m, o que implica em distintas faixas de APP. Assim, determinaram-se os pontos a partir dos quais o rio apresenta largura predominante superior a 10 m de largura. Para checar a largura dos rios, considerando os tributários principais e o rio Sapucaí, transferiu-se a base de drenagem para o *Google Earth* e, com a devida aproximação sobre a imagem de satélite, mediu-se a largura do rio. Cursos d'água com largura inferior a 10 m tem APP de 30 m em cada margem, cursos d'água com largura superior 10 m tem APP de 50 m em cada margem (BRASIL, 2012).

As APPs de declividade, altitude e de topo de morro foram obtidas a partir do MDE obtido do Projeto Topodata (VALERIANO, 2008) com resolução espacial de 30m Para as APP de declividade utilizou-se a extensão *Spatial Analyst*, empregando-se as ferramentas *Slope* e *Reclassify*.

O mapeamento das APPs de topo de morro foi realizado a partir da inversão do MDE (Topodata) conforme Hott et. al. (2005), Cunha et al. (2015), Oliveira e Fernandes-Filho (2016), considerando os dois instrumentos legais que basearam o mapeamento. Para o mapeamento de acordo com Novo Código Florestal (NCF), Lei 12.651/2012 (BRASIL, 2012), utilizou-se a rotina automatizada desenvolvida por Oliveira e Fernandes Filho (2016).

E com as devidas adaptações, sem automatização, realizou-se o mapeamento das APP de acordo com a lei revogada, a resolução CONAMA 303/2002, mencionada adiante pela sigla "CON". A Figura 12 apresenta o fluxograma resumo da metodologia.

Neste estudo, a cobertura vegetal nas APPs de topo de morro é um dos critérios para o delineamento dos cenários hipotéticos de uso e cobertura de solo. O mapeamento dessas áreas na legislação revogada (CON) e na vigente (NCF) difere em dois pontos: a definição da base do morro e o critério de declividade.

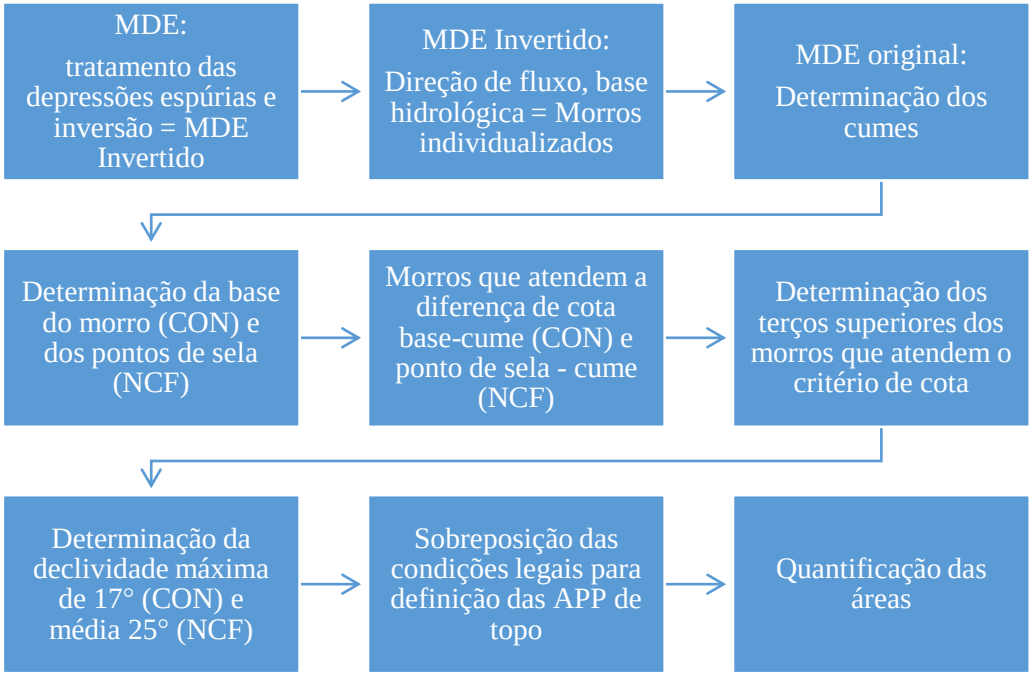


Figura 12 – Fluxograma resumo da metodologia de determinação das APP de topo de morro.

4.5. CENÁRIOS DE USO E COBERTURA DO SOLO

A bacia do rio Sapucaí é ocupada prioritariamente pelo uso agropecuário, devido aos ciclos econômicos históricos e atual baseados na pecuária bovina (corte e leite) prioritariamente extensiva, cafeicultura e outras culturas agrícolas. De acordo com Viola (2011), as pastagens ocupam 60% da área da bacia e as culturas agrícolas representam 13%, o que justifica, no presente estudo, o agrupamento desses usos em uma única classe. Ainda de segundo Viola (2011), a região da Mantiqueira, cabeceira da bacia, apresenta a maior pressão de conversão de floresta em agropecuária. Nesta região encontra-se a maior parte dos remanescentes florestais da bacia e embora parte desta esteja dentro dos limites de diferentes Unidades de Conservação, a vulnerabilidade é grande, considerando a expansão agropecuária e especulação imobiliária no entorno de cidades (SOUZA, 2016).

Os cenários de uso e cobertura do solo (UCS) são hipotéticos e estáticos, apresentando diferentes graus de degradação de vegetação nativa relacionados, principalmente, às mudanças nos parâmetros legais que definem as APPs em topos de morros e elevações, adaptado de Koumrouyan (2015). Além disso, foram consideradas tendências de mudança no uso da terra nesta bacia.

Para elaboração dos cenários foram utilizadas, basicamente, as ferramentas para conversão dos arquivos de raster para polígonos e vice-versa, alteração no valor que identifica as classes e montagem de mosaicos. Assim, o primeiro cenário de UCS, denominado C_1, possui cobertura florestal nas APP de topo de morro de acordo com o Código Florestal vigente, Lei 12.651/2012 (BRASIL, 2012), somadas as tendências de substituição de uso da terra na região nos próximos 100 anos, conforme Mello et al. (2015), em que 20% dos fragmentos florestais remanescentes serão convertidos em áreas de agropecuária. Neste estudo, esta tendência de conversão foi aplicada aos fragmentos florestais pequenos, com área menor que 10 hectares.

O segundo cenário, C_2, apresenta a cobertura florestal das APP de topo de morro de acordo com o antigo código florestal e Resolução CONAMA 303/2002; representando um cenário otimista do ponto de vista de conservação da cobertura florestal nas APP de topo de morro. Este cenário conserva a cobertura florestal atual da bacia, mantendo os fragmentos florestais pequenos e recupera a vegetação das APP de topo de morro que atualmente não possuem cobertura florestal.

O terceiro cenário, C_3, tal como o anterior, considera as APP de acordo Resolução CONAMA 303/2002 e recupera a cobertura florestal das APP em todas as categorias. Representa, portanto, o cumprimento legal da referida resolução.

Estes três cenários hipotéticos foram propostos e aplicados à bacia inteira. Para uma análise mais detalhada e alinhada com outros trabalhos da categoria, um quarto cenário (C_4) foi desenhado apenas para a sub-bacia Vargem do Cervo (Estação 61390000). O C_4 apresenta uma cobertura florestal em área total da sub-bacia, exceto nas áreas identificadas pelas classes água e urbana.

4.6. SIMULAÇÕES A PARTIR DOS CENÁRIOS DE USO DO SOLO

Com o MGB-IPH calibrado para a bacia, procedeu-se a simulação dos cenários de uso do solo.

A primeira rodada de simulações se refere apenas aos impactos hidrológicos decorrentes das mudanças na cobertura vegetal que envolveram conversão de floresta na classe agropecuária e vice-versa. Portanto, não contemplam alteração de parâmetros, bem como aspectos associados ao manejo e conservação do solo, os quais podem alterar as condições de permeabilidade do perfil, com implicações diretas no balanço hídrico (BONNEL et al., 2010 *apud* VIOLA, 2011).

Em um segundo momento, alterou-se o parâmetro "Resistência Superficial" fixando-o com valor 60 tanto para classe "agropecuária" quanto para classe "floresta", de acordo com Bayer (2014).

5. RESULTADOS

5.1. MAPEAMENTO DAS ÁREAS DE PRESERVAÇÃO PERMANENTE – APP E CONFLITOS DE USO DO SOLO

O mapeamento das APP de acordo com a legislação vigente, considerando todas as categorias aplicáveis à área de estudo, resultou em uma área total de 51.873,37 hectares (ha), o que representa 5,59% da área de estudo. A área ocupada por cada categoria de APP está resumida na Tabela 1.

As APP de curso d'água e cabeceiras (nascentes) realizado sobre a rede de drenagem obtida do IBGE, na escala 1:250.000, resultou em 41.084 ha de áreas protegidas nas margem de rios, ribeirões e córregos e 841 ha representando a área ao redor das 1074 nascentes em toda bacia. As APP de declividade ocupam uma área de 449 ha e as de altitude superior a 1800 m ocupam 10.171 ha. As APP de topo de morro, de acordo com o NCF, ocupam 20 ha em toda a bacia, o que representa 0,002% da área da bacia.

Tabela 1 – Área (hectares) das diferentes categorias de APP mapeadas.

Categoria de APP	Área (ha)*	% área de estudo
Nascente	841	0,09
Margem de rio (30 m)	36.849	3,97
Margem de rio (50 m)	4.235	0,45
Declividade superior 45º	449	0,04
Topos de morro	20	0,002
Altitude superior 1800 m	10171	1,09
*Áreas compatíveis com a base de dados utilizada: MDE 30m (TOPODATA, 2008); base hidrográfica 1:250.000 (IBGE, 2016).		

Embora as mudanças na lei do NCF alterem outras categorias de APP, além de topo de morro; com a base de dados disponível e conforme objetivos do presente estudo, apenas as APP Topo de Morro foram mapeadas de forma diferente, de acordo com a lei vigente e revogada.

Assim, o mapeamento da base legal CON (que considerou a menor cota da base do morro), resultou em 768 morros e, aplicado o critério de declividade máxima de 17º, 728 morros atendem o critério e seus respectivos terços superiores totalizam 7149,19 ha (0,77 % da área total da bacia), conforme Figura 13. A definição de APP de topos de morro do NCF, com o critério de diferença de cota superior a 100 m entre a base e o cume do morro, reduziu o número de morros com APP. O mapeamento da base legal NCF (que considerou o ponto de sela) indicou 132 morros que atendem tal condição, mas, ao se aplicar o critério de declividade média superior a 25º, restaram quatro morros, cujo terço superior representa o total de APP com 20 ha (0,002% da área total da bacia), apresentado na Figura 14. A redução dessa categoria de área protegida para a bacia do rio Sapucaí é superior a 99% com a aplicação do código vigente.

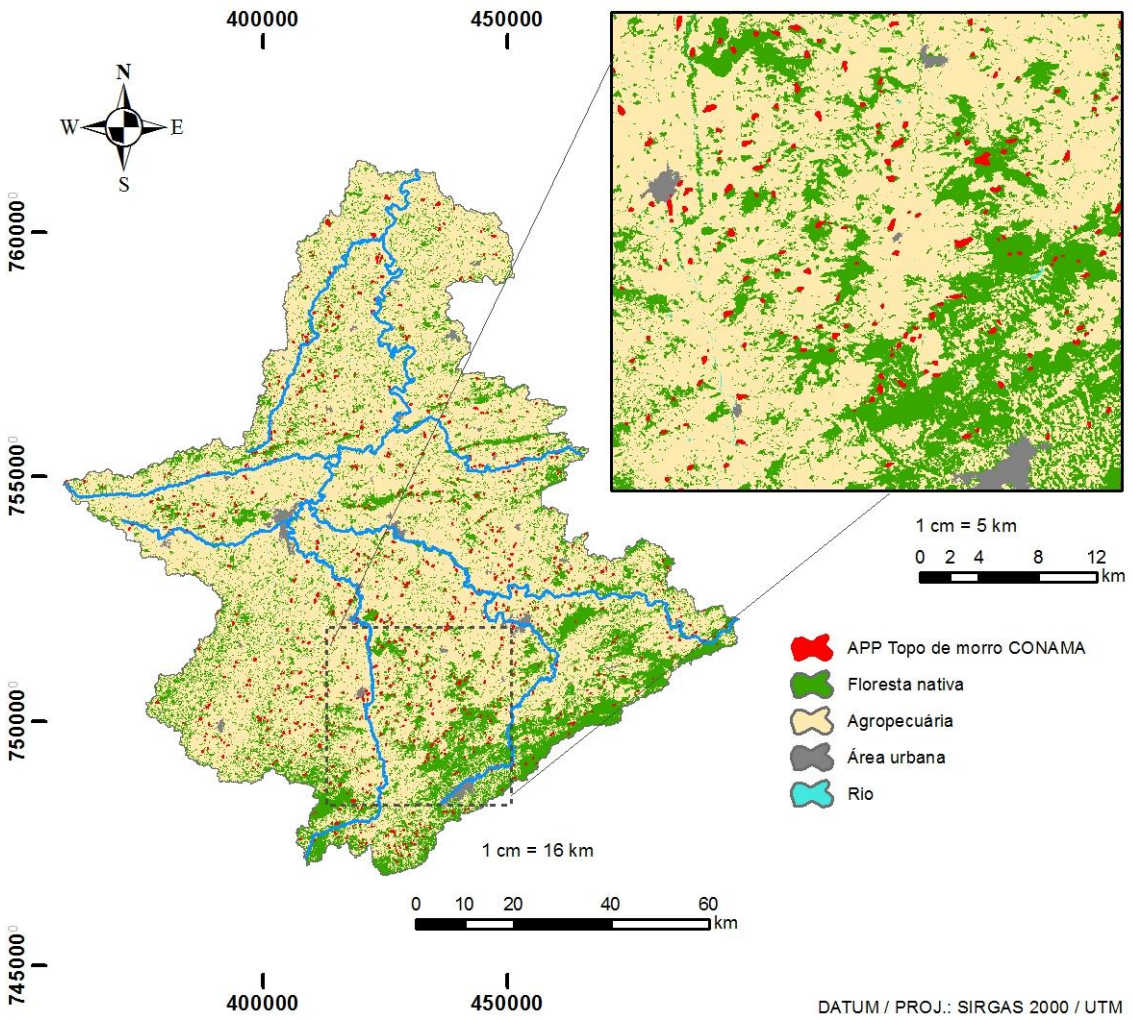


Figura 13 - Mapeamento de APP de topo de morro, de acordo com resolução revogada (CONAMA 303/2002) para a bacia do rio Sapucaí.

A Figura 14 apresenta o mapeamento de APP de topo de morro de acordo com o Código Florestal vigente (Lei 12.651/2012), com detalhe em três dos quatro morros legalmente protegidos (devido à área reduzida dos polígonos, os mesmos não são bem representados na figura da bacia inteira).

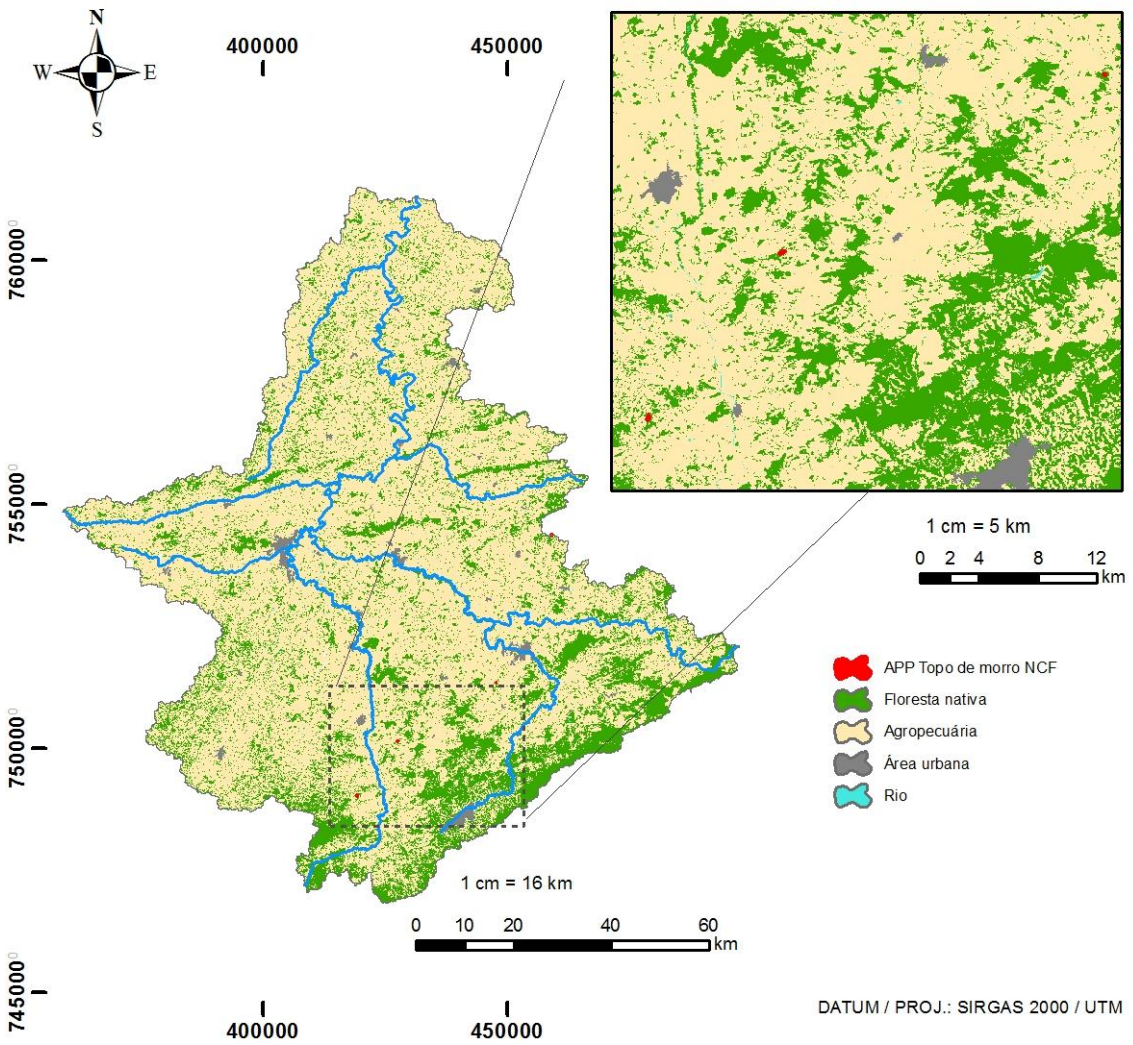


Figura 14 - Mapeamento de APP de topo de morro de acordo com o Código Florestal vigente (Lei 12.651/2012) e detalhe de três dos quatro morros.

De acordo com o Código Florestal vigente, verificou-se o uso irregular do solo em 328 km² da bacia, significa que 56% da área das APP estão atualmente sob o uso agropecuário, o que pode ser visualizado nas Figuras 15 e 18, que apresentam carta imagem recente (anos 2013 e 2011), com resolução espacial de 5 m, da região do rio Lourenço Velho na parte baixa e cabeceira, respectivamente. Os pontos 1 e 2, na Figura 15, referem-se às fotos de campo apresentadas nas Figura 16 e Figura 17. Os pontos 3 e 4, na Figura 18, referem-se às fotos de campo apresentadas nas Figura 19 e Figura 20. Nem toda esta área, no entanto, deve ser considerada como passivo ambiental, visto que a lei vigente anistia os desmatamentos anteriores ocupam 5 km² (1,5% das APP total) em toda bacia e neste ponto, há outra falha do Código vigente, que não trata especificamente do tema; seja para áreas consolidadas ou em áreas para expansões futuras.

Considerando-se a Resolução revogada CONAMA 303/2002, em que as APP de topo de morro distribuem-se por toda a bacia, o uso irregular do solo nestas áreas é de 64%, ou 45,57 km² estão prioritariamente sob uso agropecuário. Adicionando-se as APP de margens de rio e nascentes, tem-se o total de 373,57 km² de APP sob uso irregular.

Importante atentar para as legendas das Figura 15 e Figura 18 que apresentam em amarelo todas as categorias de APP mapeadas de acordo com o NCF e em vermelho as APP de topo de morro definidas na Resolução CONAMA 303/2002. As regiões da bacia apresentadas por estas imagens não apresentam APP de topo de morro de acordo como a lei vigente (NCF).

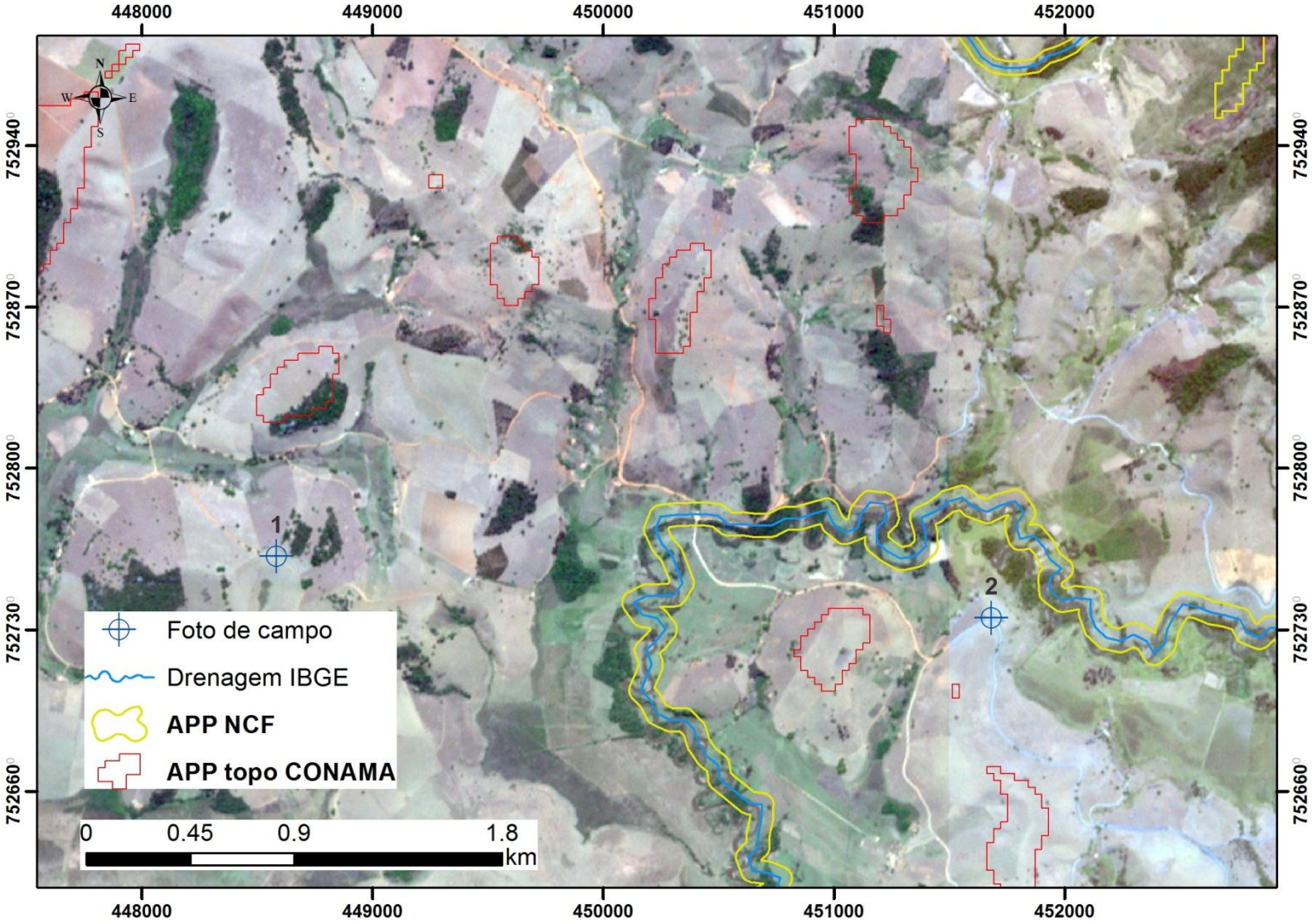


Figura 15 – Carta imagem com sobreposição de APP na região do rio Lourenço Velho, entre os municípios de Itajubá e São José do Alegre. FONTE: Imagem RapidEye, ano 2013 (MMA, 2016).

Figura 16 – Várzea do rio Lourenço Velho vista do ponto 1, município de São José do Alegre. Foto: Paula C. Siqueira, Jul. 2016.

Figura 17 – Várzea do rio Lourenço Velho e relevo a leste do ponto 2, município de Itajubá. Foto: Paula C. Siqueira, Jul. 2016.

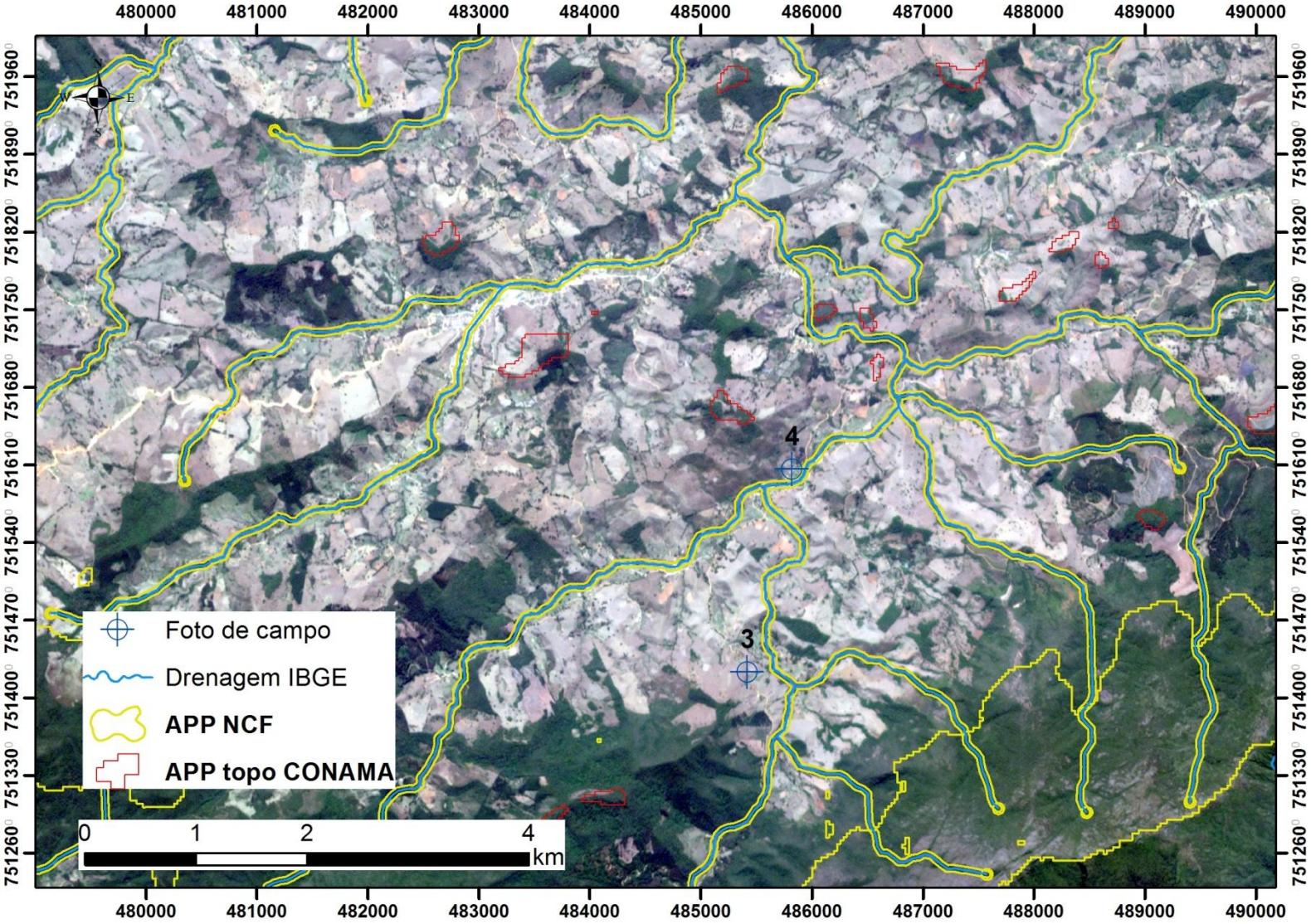


Figura 18 – Carta imagem e sobreposição de APP na cabeceira do rio Lourenço Velho, região de Marmelópolis e Virgínia.
Fonte: Imagem RapidEye, ano 2011 (MMA, 2016).

Figura 19 – Vista ao sul do ponto 3, paisagem da cabeceira da bacia na Serra da Mantiqueira, região do Pico dos Marins em Marmelópolis, MG. Foto: Paula C. Siqueira, Jul. 2016

Figura 20 – Ponto 4, Córrego da Cata, afluente na cabeceira da bacia do rio Sapucaí, Serra da Mantiqueira, em Marmelópolis, MG. Foto: Paula C. Siqueira, Jul. 2016

5.2. CENÁRIOS DE USO DO SOLO

Os cenários hipotéticos baseados em tendências de modificações de uso do solo e cobertura das APP de topo de morro de acordo com lei revogada e vigente são descritos a seguir. A Tabela 2 apresenta as áreas de cada classe e percentuais em relação a área da bacia. A Figura 21 traz os percentuais de cobertura florestal e agropecuária no uso atual e em cada cenário.

O cenário C1, baseado no NCF e tendência de modificação do uso do solo na bacia, apresenta a conversão de 472 km² de remanescentes florestais em agropecuária, devido a remoção da cobertura vegetal nas áreas não mais consideradas APP de topo de morro e ausência dos fragmentos florestais com área inferior a 10 ha. Tal conversão representa uma modificação de 5,09 % no contexto de área total da bacia, em relação ao uso atual. É o cenário de maior degradação da cobertura florestal na bacia e nas APPs de topo de morro.

O cenário C2, baseado na Resolução CONAMA 303/2002, apresenta um pequeno incremento de floresta em relação ao uso atual, 45,56 km² e foi desenhado com o objetivo de verificar eventual influencia da revegetação das APP de topo de morro no ciclo hidrológico da bacia. No contexto da bacia como um todo, representa uma alteração inferior a 0,5%.

O cenário C3 possui um incremento de floresta de 890 km² por considerar o efetivo cumprimento legal da Resolução CONAMA 303/2002. Representa alteração de 9,6 % da área total da bacia.

Tabela 2 – Uso do solo atual e cenários com respectivas áreas da bacia do rio Sapucaí.

CENÁRIOS DE USO DO SOLO E ÁREA EM km² - SAPUCAÍ				
	Floresta nativa	**% bacia**	**Agropecuária**	**% bacia**
ATUAL	2155,25	23,25	6975,84	75,24
C1 / NCF	1683,25	18,16	7457,64	80,44
C2 / CON.	2200,81	23,74	6940,07	74,86
C3 / CON-REC	3045,37	32,85	6138.20	66.21

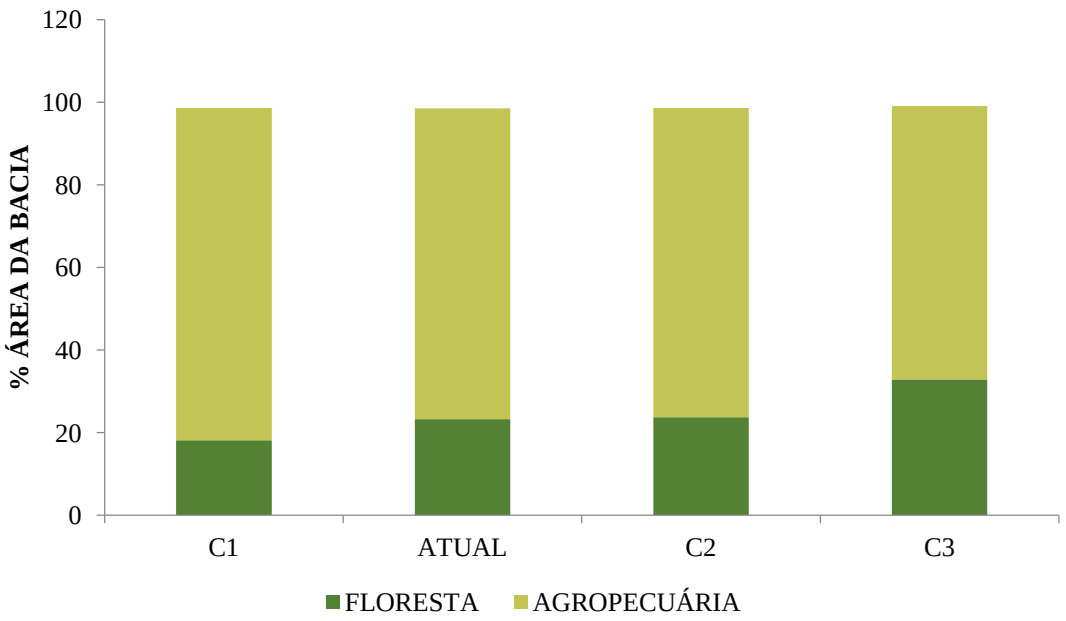


Figura 21 – Áreas percentuais cobertas por floresta e agropecuária no uso atual e três cenários hipotéticos aplicados a bacia do rio Sapucaí.

Na sub-bacia Vargem do Cervo, em que se aplicou o cenário C4, tem-se 55,9 km² de floresta, alteração de 88,4 % em relação ao uso do solo atual e área total da sub-bacia. A área de drenagem desta sub-bacia é de 484 km² e foi escolhida por apresentar bons resultados na calibração. As áreas e percentuais são apresentados na Tabela 3 e Figura 22.

Tabela 3 - Uso do solo atual e cenários com respectivas áreas da sub-bacia Vargem do Cervo.

CENÁRIOS DE USO DO SOLO E ÁREA EM km² - VARGEM DO CERVO				
	Floresta nativa	**%**	**Agropecuária**	**%**
ATUAL	55.9	11.6	425.41	87.89
C1	81.0	16.7	399.00	82.44
C2	83.4	17.2	401.40	82.93
C3	129.7	26.8	351.99	72.73
C4	480.0	99.2	0	0

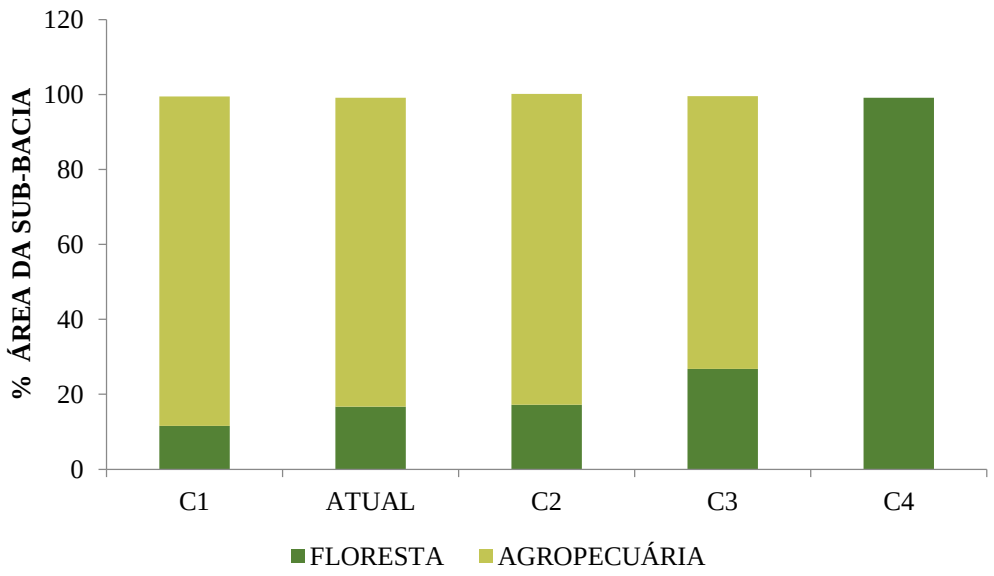


Figura 22 - Áreas percentuais cobertas por floresta e agropecuária no uso atual e cenários hipotéticos aplicados a sub-bacia “Vargem do Cervo”.

5.3. SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA

5.3.1. DISCRETIZAÇÃO DA BACIA E DEFINIÇÃO DAS URH

Na etapa de discretização, as 11 sub-bacias delimitadas por suas estações fluviométricas foram segmentadas em 1294 minibacias e dentro destas, obteve-se as URH.

Considerando uma URH como uma combinação única de tipo de solo e de uso da terra, admite-se que uma dada URH tenha o mesmo comportamento hidrológico independentemente de onde esteja localizada dentro da bacia. Assim, o balanço hidrológico foi calculado para cada URH de cada mini-bacia e as vazões estimadas em cada URH foram posteriormente somadas e propagadas até a rede de drenagem. Além disso, parâmetros do modelo, como, a capacidade de armazenamento de água no solo (*Wm*), estão relacionados às URH (FAN et al. 2010).

Utilizando-se as ferramentas *Combine* e *Reclassify* do ArcGis, foram definidas 10 URH a partir da combinação das 4 classes de uso do solo (agropecuária, floresta nativa, área urbana e água) e 4 classes de solo (A, B, C e D). As combinações contendo o uso “área urbana” e “água” foram agrupadas em uma única classe, por seu comportamento hidrológico independente da classe de solo. A Figura 23 apresenta o Mapa de URH da bacia no cenário atual de uso do solo, que foi utilizado na calibração do modelo.

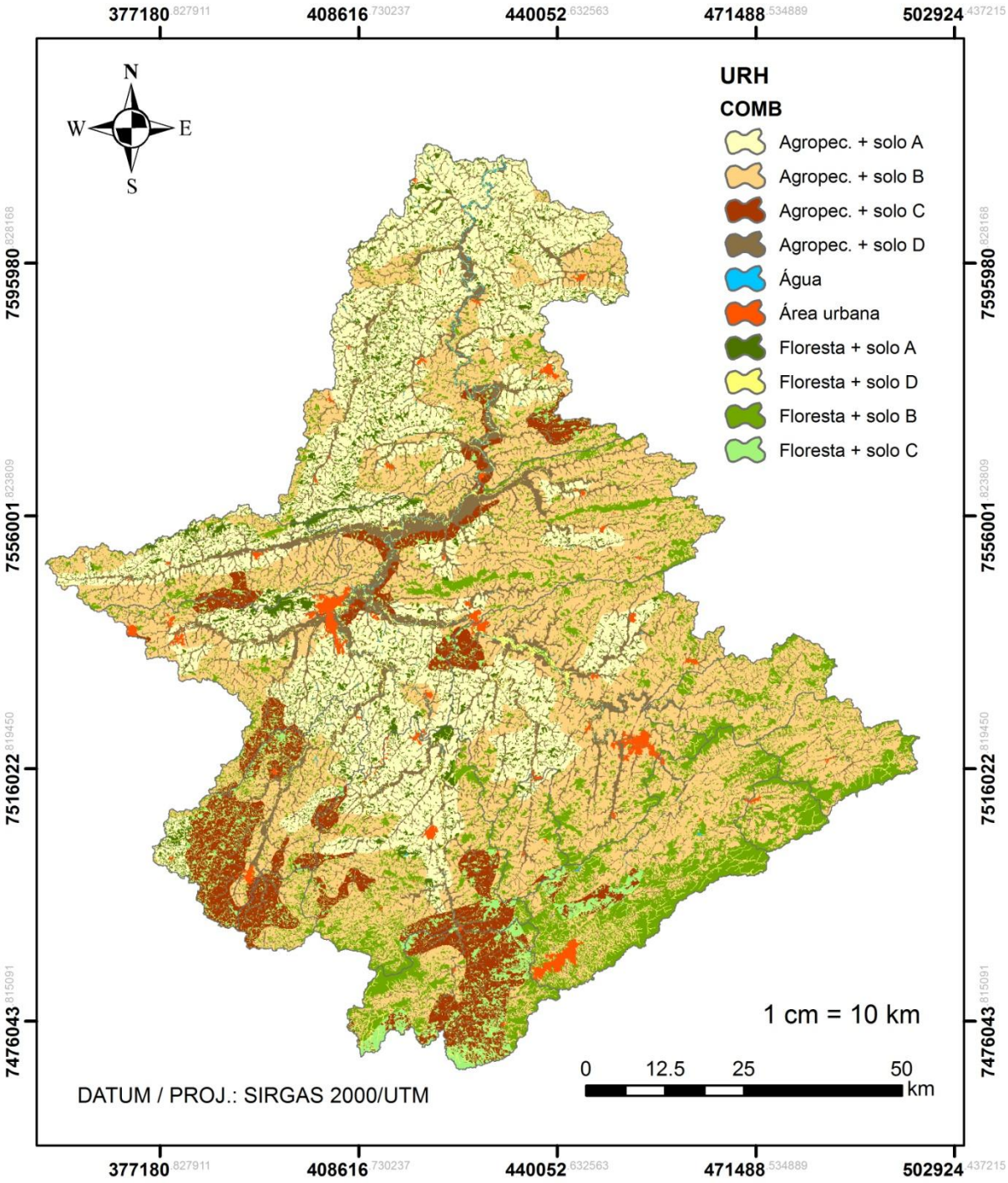


Figura 23 – Mapa de Unidades de Resposta Hidrológica (URH) do cenário real da bacia.

5.3.2. CALIBRAÇÃO

A calibração do modelo busca reproduzir os hidrogramas por meio de ajustes de parâmetros do modelo (BAYER, 2014). O período de calibração adotado foi de 1975 a 1984, considerando o conjunto de dados mais completo das estações fluviométricas utilizadas.

Realizou-se a calibração espacial, feita para cada sub-bacia e considerado o mais adequado para este tipo de estudo de acordo com Niraula; Meixner; Norman (2015).

Os valores dos parâmetros foram baseados na literatura (COLLISCHONN, 2001; BAYER, 2014). Os valores adotados para os parâmetros fixos são apresentados na Tabela 4, em que **IAF** é o índice de área foliar e $\mathbf{r_s}$ é a resistência superficial.

Tabela 4 – Valores dos parâmetros fixos adotados para cada classe de uso.

	PARÂMETROS			
USO DO SOLO	**Albedo**	**IAF**	**Altura (h)**	$\mathbf{r_s}$
Agropecuária	0,18 - 0,26	1,0 - 4,0	0,5 - 1	40 - 80
Floresta	0,13	6,0 - 9,0	20	100
Área urbana	0,20	1,0	0	0
Água	0,08	1,0	0,1	0

A calibração do modelo foi satisfatória, apresentando valores considerados aceitáveis para as sub-bacias. Os valores dos coeficientes Nash, Nash Log e Erro de volume constam na Tabela 5.

Tabela 5 – Resultados da calibração espacial para as sub-bacias.

SUB-BACIA	POSTO	Área (km²)	Nash	Nash Log	Erro Vol.
1	São João - Itajubá	857	0.609	0.708	-1.499
2	Virginia	268	0.318	0.396	-16.615
3	Itajubá	554	0.584	0.655	-12.825
4	Brazópolis	156	0.743	0.533	12.662
5	Santa Rita do Sapucaí	2806	0.721	0.837	-0.319
6	Conceição dos Ouros	116	0.571	0.68	-8.541
7	Cambuí	1332	0.668	0.727	27.614
8	Pouso Alegre	672	0.684	0.83	-2.651
9	Vargem do Cervo	484	0.707	0.777	-4.367
10	Careaçu	7320	0.721	0.697	-17.851
11	Paraguaçu	9271	0.785	0.891	4.204

De forma geral, o modelo representou bem o comportamento hidrológico da bacia. A Figura 24 apresenta os hidrogramas da sub-bacia 1, Posto São João – Itajubá, localizada na

região de cabeceira da bacia do Sapucaí. A Figura 25 traz os hidrogramas para sub-bacia 7, Vargem do Cervo, localizada a noroeste da bacia. A Figura 26 apresenta os hidrogramas da sub-bacia 5, Santa Rita do Sapucaí, no trecho médio da bacia.

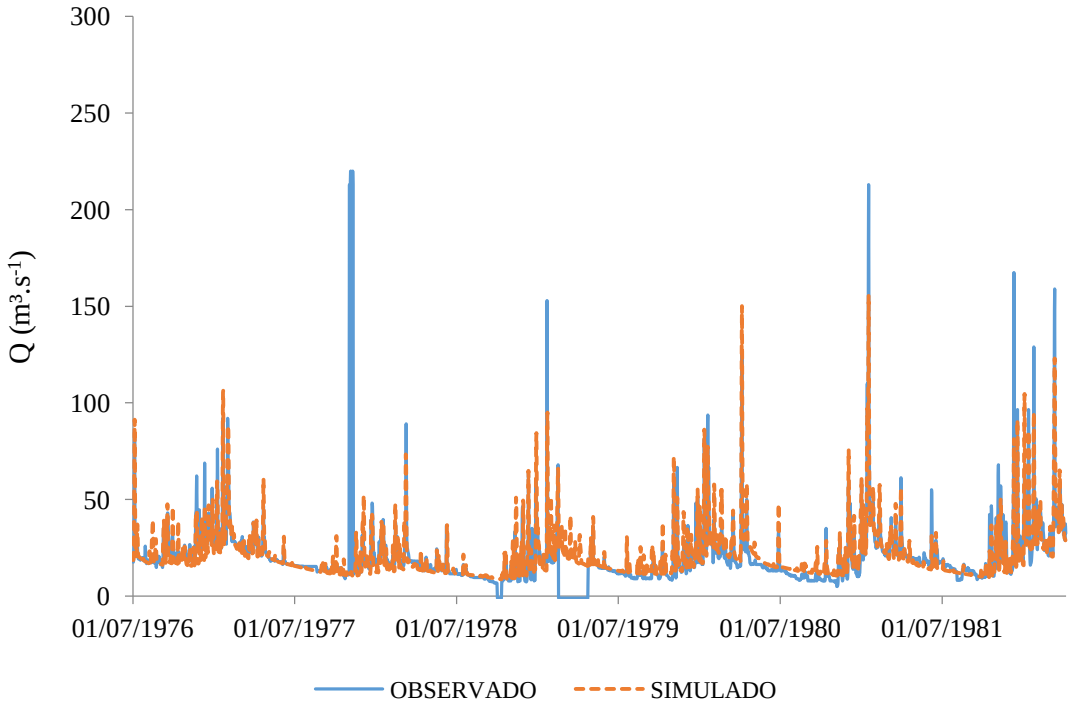


Figura 24 – Hidrograma observado e simulado para sub-bacia 1, São João – Itajubá.

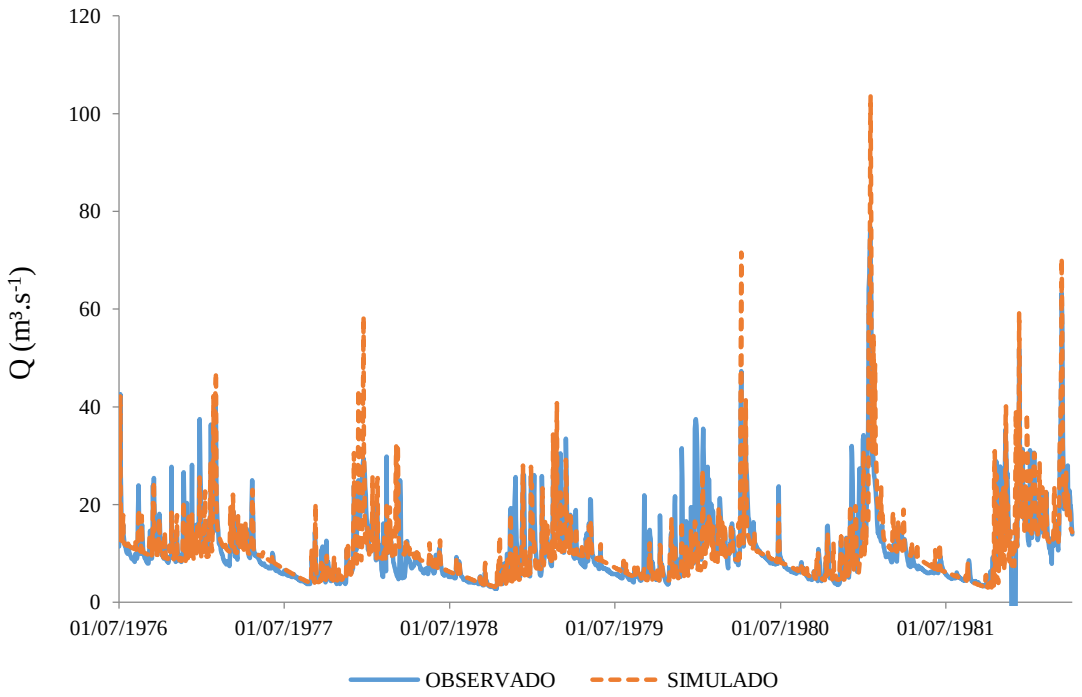


Figura 25 - Hidrograma observado e simulado para sub-bacia 7, Vargem do Cervo.

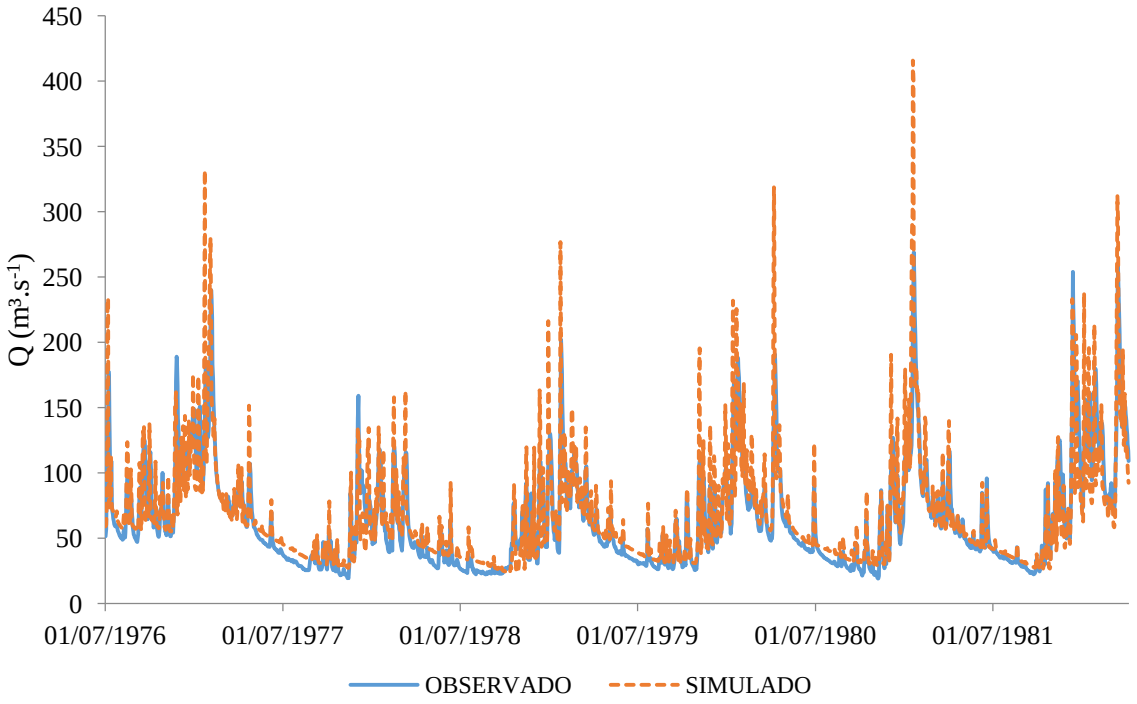


Figura 26 – Hidrograma observado e simulado da sub-bacia 5, Santa Rita do Sapucaí.

5.3.3. SIMULAÇÃO DOS CENÁRIOS HIPOTÉTICOS

O período das simulações foi de 1960 a 2013. A simulação das vazões nos cenários atual e hipotéticos não apresentou diferenças significativas, o que pode ser visto na Figura 27, em que as médias das vazões diárias se sobrepõem, indicando que as modificações propostas nos cenários hipotéticos não alteraram o ciclo hidrológico da bacia na escala em que foram analisados.

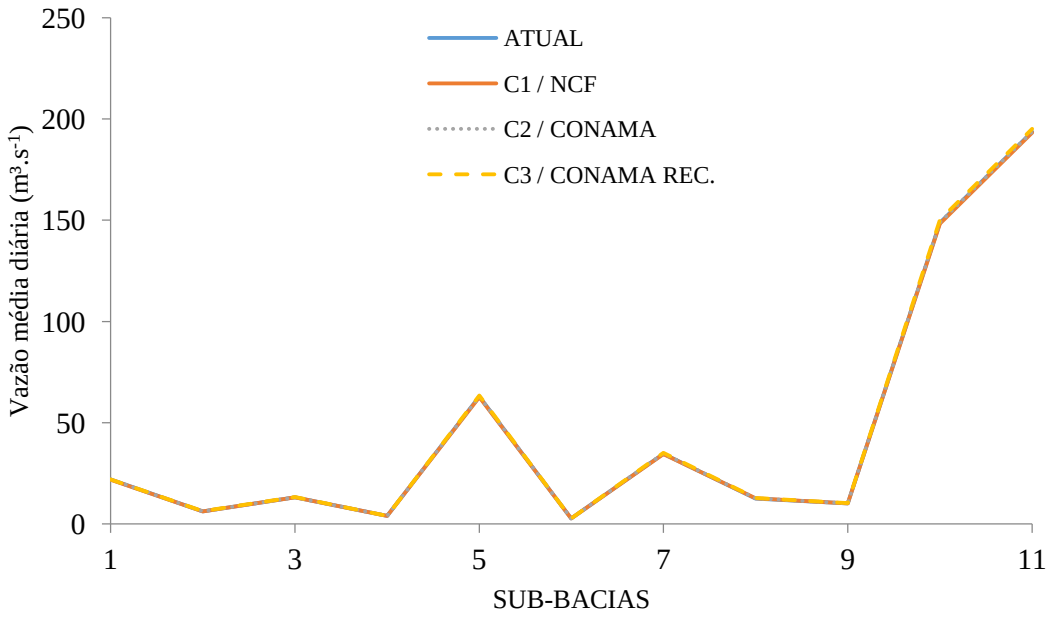


Figura 27 – Vazão média simulada nos diferentes cenários nas 11 sub-bacias.

A Tabela 6 apresenta a vazões de permanência na sub-bacia Paraguaçu, no exutório da bacia, simuladas para a condição atual e cenários. E a Figura 28 apresenta as curvas de permanência.

Tabela 6 – Vazões de permanência simuladas para condição atual e cenários na sub-bacia Paraguaçu.

	$Q_{10\%}$	$Q_{20\%}$	$Q_{50\%}$	$Q_{80\%}$	$Q_{90\%}$
ATUAL	356.67	269.56	153.79	95.92	80.56
C1	356.71	269.17	152.55	94.85	79.52
C2	356.58	269.46	154.11	96.29	80.90
C3	358.19	270.98	155.91	97.07	81.82

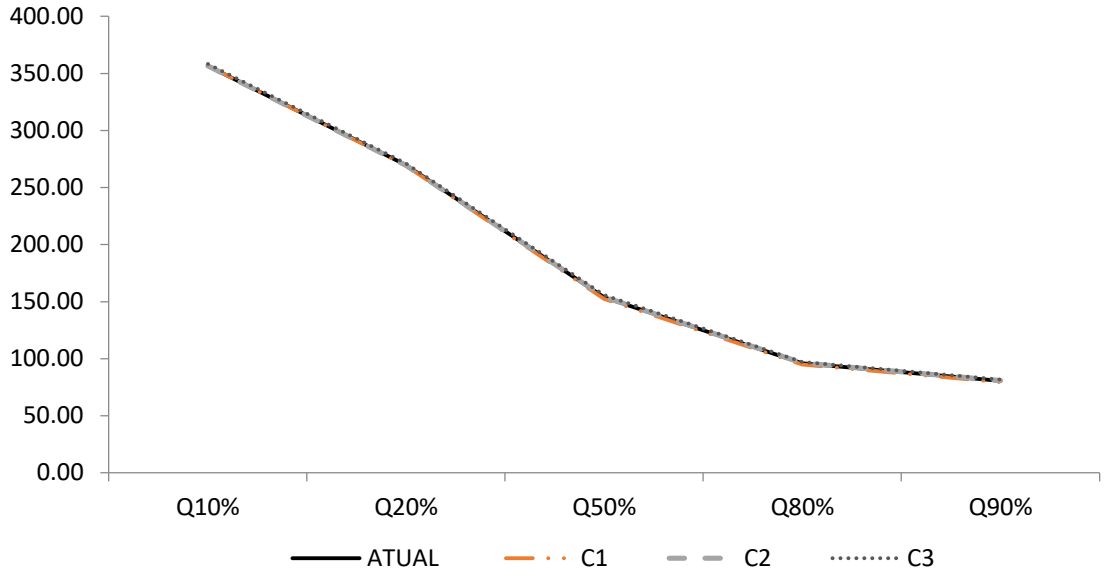


Figura 28 – Curva de permanência obtida das simulações para condição de uso do solo atual e cenários na sub-bacia Paraguaçu, no exutório da bacia.

Na análise dos diferentes componentes do ciclo hidrológico para a sub-bacia "Vargem do Cervo" é possível observar a importância do escoamento subterrâneo (**Q_{sub}**) no cômputo do escoamento total, com destaque para o período de recessão, conforme Figura 29, em que **Q_{sub}** representa o escoamento subterrâno, **Q_{ss}** o escoamento subsuperficial, **Q_{sup}** é o escoamento superficial e **Q_{total}** representa a soma dos anteriores.

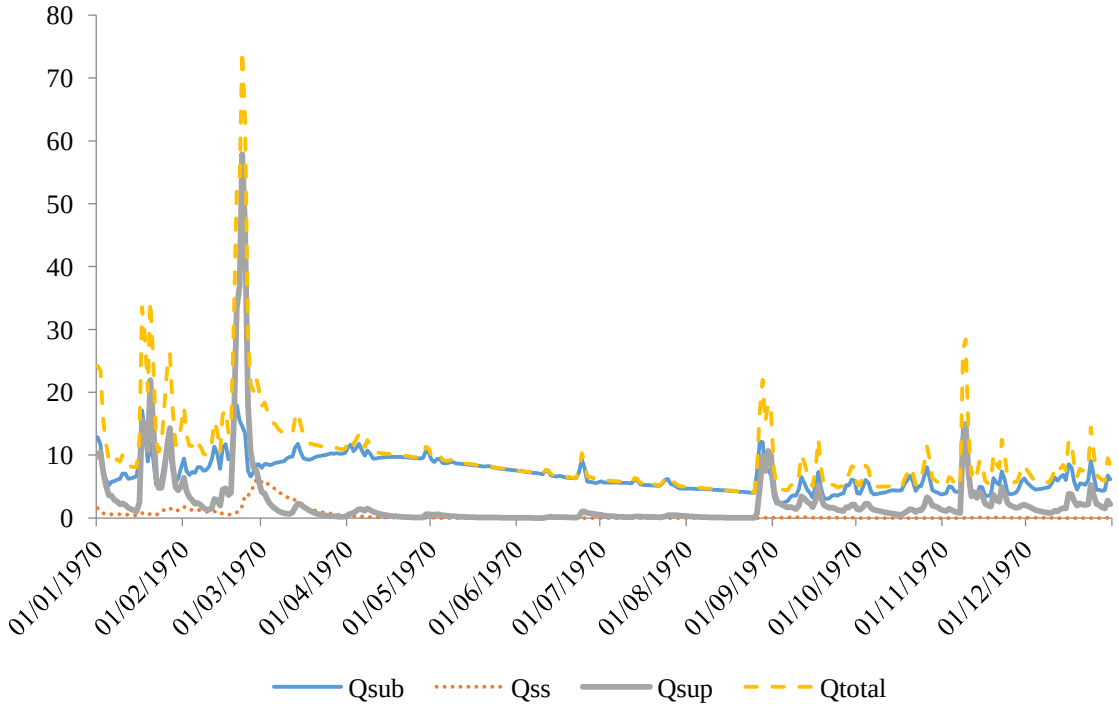


Figura 29 – Componentes do escoamento na sub-bacia Vargem do Cervo.

A Tabela 7 apresenta os componentes do escoamento em todos os cenários aplicados a esta sub-bacia. Verificou-se que o escoamento subterrâneo (Qsub) apresentou redução no C_1 e incremento em C_2, C_3 e C_4 em relação ao cenário atual, sendo que C_3 apresentou o maior aumento. O escoamento sub-superficial apresentou aumento nos três cenários, sendo que o C_4 apresentou o maior aumento. A lâmina de escoamento superficial foi a maior no C_1, com pequenas variações em C1, C2 e C3; em C4 foi a menor. O escoamento total (Qtotal) em C_1 apresentou redução, enquanto que C_2, C_3 e C4 apresentaram aumento, sendo que C4 teve o maior aumento entre os cenários comparados ao cenário atual.

Tabela 7 – Vazão média anual (mm) simulada nos compartimentos subterrâneo (Qsub), sub-superficial (Qss), superficial (Qsup), total (Q), variação do cenário em relação ao atual (ΔQ).

Qmédia/anual	**Qsub**	ΔQsub	**Qss**	ΔQss	**Qsup**	ΔQsup	**Qtotal**	ΔQtotal
ATUAL	2575.66	0.00	241.31	0.00	1067.59	0.00	3884.56	0.00
C_1	2546.25	-29.41	243.27	1.95	1080.24	12.65	3869.76	-14.81
C_2	2577.71	2.05	241.41	0.09	1066.51	-1.08	3885.62	1.06
C_3	2597.24	21.58	247.97	6.66	1069.53	1.94	3914.75	30.18
C_4	3008.76	433.10	217.29	-24.02	892.23	-175.36	4118.28	233.72

Outros componentes do balanço hídrico para a sub-bacia “Vargem do Cervo” são apresentados na Tabela 8 na qual se verifica a relação direta entre o aumento da capacidade de armazenamento de água no solo (W_{BM}), interceptação (α), escoamento subterrâneo (Qsub) e aumento da cobertura florestal. O C4 apresentou lâmina d’água superior em 101 mm no W_{BM} comparado ao uso atual, o que pode ser visualizado nas Figura 30, 31 e Figura 32. Na Figura 30, que apresenta o armazenamento de água no solo, é possível visualizar também a sensível redução do W_{BM} no C1. A interceptação, apresentada na Figura 31, aumenta com aumento da cobertura florestal, sendo que o C4 apresenta uma lâmina interceptada 98% superior comparada à condição de uso do solo atual. A Figura 32 apresenta a variação do escoamento subterrâneo nos diferentes cenários.

O aumento de água no solo e a redução do escoamento superficial (Q_{sup}) com o aumento da cobertura florestal no C4 pode ser verificado na Tabela 8, que apresenta os valores médios dos componentes do balanço hídrico.

Tabela 8 – Valores médios de longo período nos diferentes componentes do balanço hídrico da sub-bacia Vargem do Cervo.

	Valores de longo período (mm.ano^{-1})				
	ATUAL	**C1**	**C2**	**C3**	**C4**
W_{BM}	42262.9	39482.46	41781.72	46401.1	79125.65
P	1461.42	1461.6	1461.6	1461.6	1461.42
Lam. Int.	100.48	93.12	99.24	114.27	199.93
ET	821.43	810.36	807.69	800.02	776.85
Qsup	199.09	197.14	195.09	196.87	173.43
Qsub	409.59	400.94	405.75	408.49	479.38
Q	644.6	633.8	636.4	642.89	688.05
C (Q/P)	0.44	0.43	0.44	0.44	0.47

W_{BM}: água no solo; **P:** precipitação; α: interceptação; **Lam. Int**: Lâmina interceptada; **ET:** evapotranspiração; **Qsup**: escoamento superficial; **Qsub**: escoamento subterrâneo; **C:** coeficiente de escoamento.

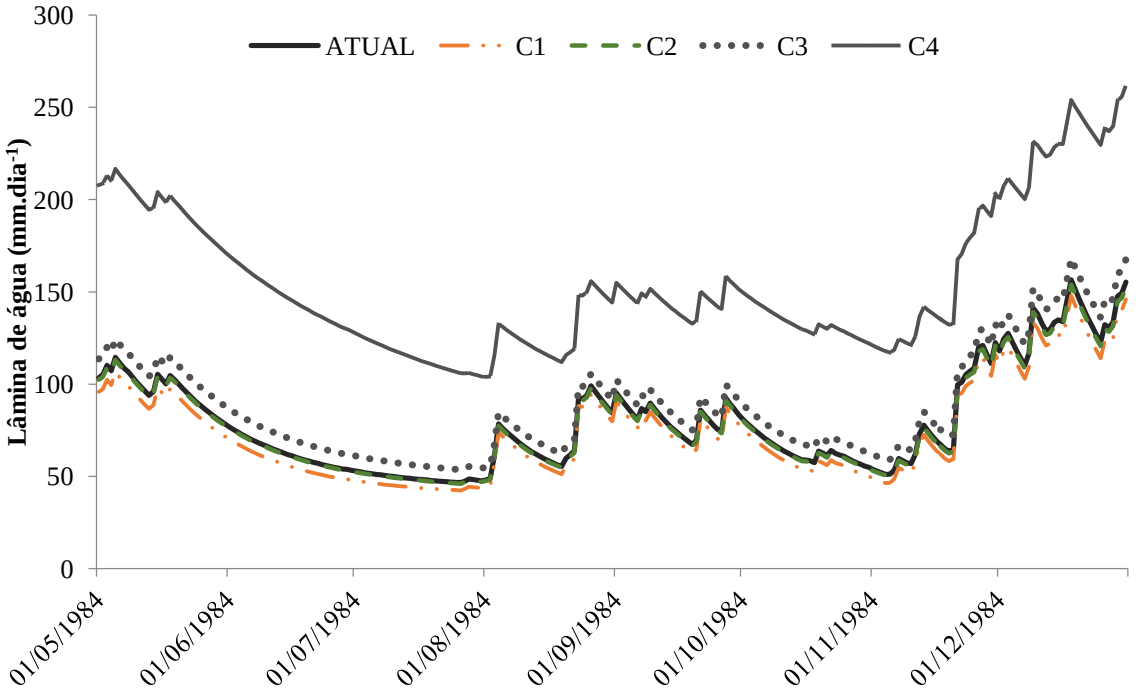


Figura 30 - "Água no solo" (W_{BM}) simulada para condição atual e cenários na sub-bacia Vargem do Cervo.

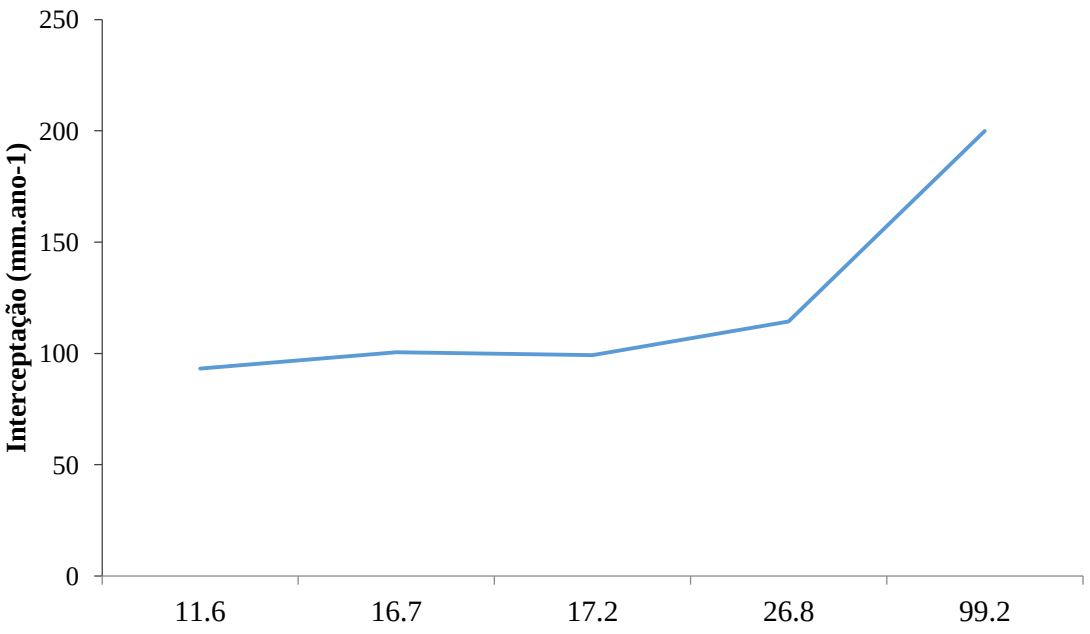


Figura 31 – Lâmina interceptada em relação ao % de cobertura florestal no C1, atual, C2, C3 e C4 respectivamente.

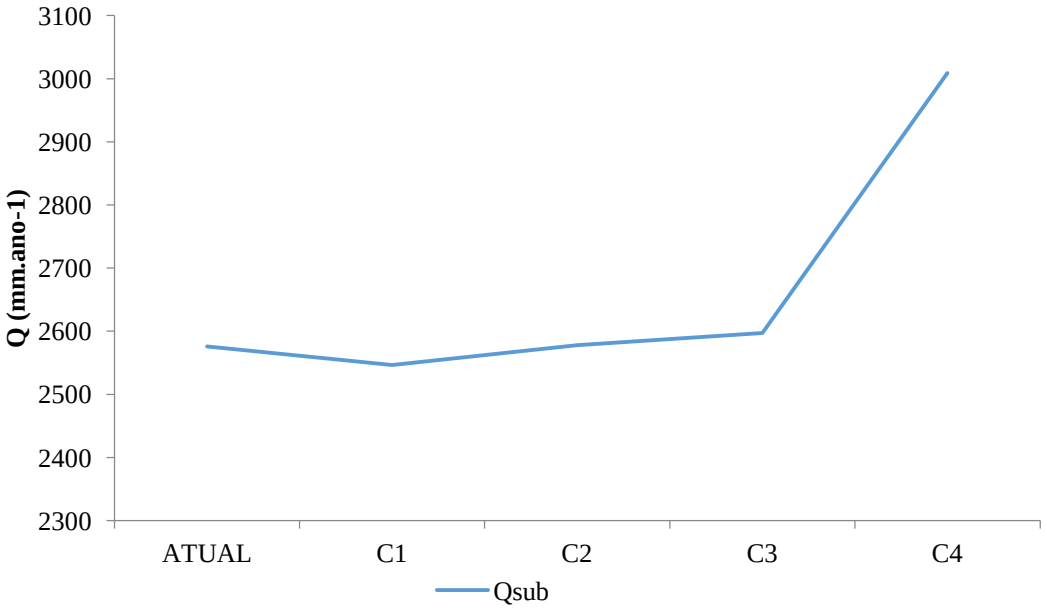


Figura 32 – Variação do escoamento subterrâneo simulado (mm/ano) na condição atual e nos cenários aplicados a sub-bacia Vargem do Cervo.

O escoamento subterrâneo (Qsub) pode ser também analisado pela Figura 33, que mostra as médias diárias nos diferentes cenários para um período que inclui a estação seca e chuvosa. A lâmina diária chega a ser 2,5 mm superior no C4 em relação uso atual no período de recessão, entre junho e julho.

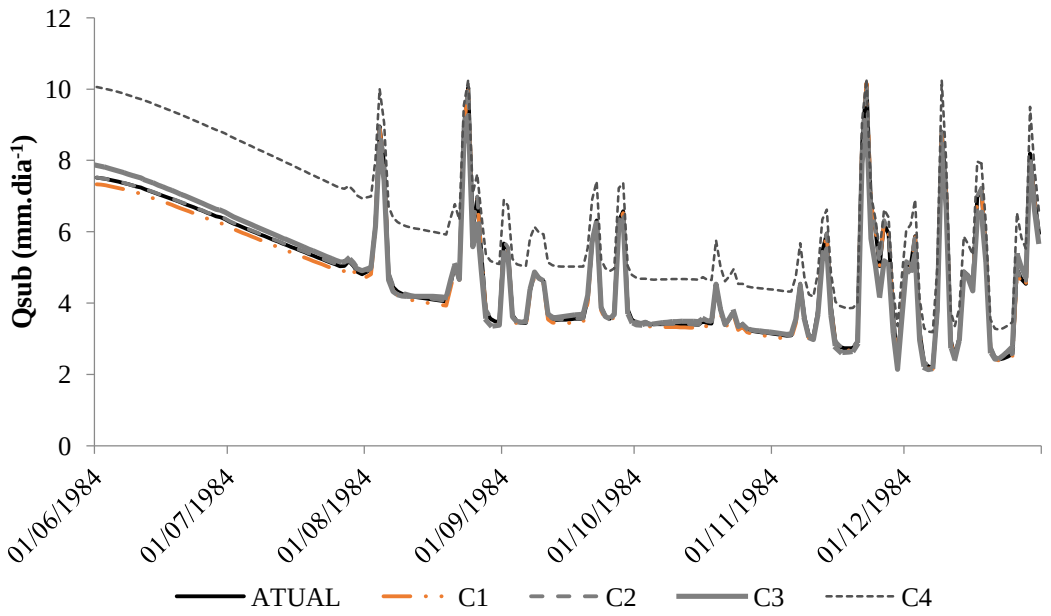


Figura 33 – Médias diárias de escoamento subterrâneo nos diferentes cenários.

As vazões por origem em cada um dos cenários são apresentadas na Figura 34 em que se verifica o aumento nos escoamentos subterrâneo, sub-superficial e total que coincide com o aumento da cobertura florestal. Há, no entanto, a redução do escoamento superficial a medida que se aumenta a área de floresta na sub-bacia, tendência observada no C3 e C4, sendo mais notável no ultimo. A Figura 36 mostra o escoamento superficial nos diferentes cenários, sendo clara a redução deste, assim como os picos de vazão no cenário com maior cobertura florestal (C4).

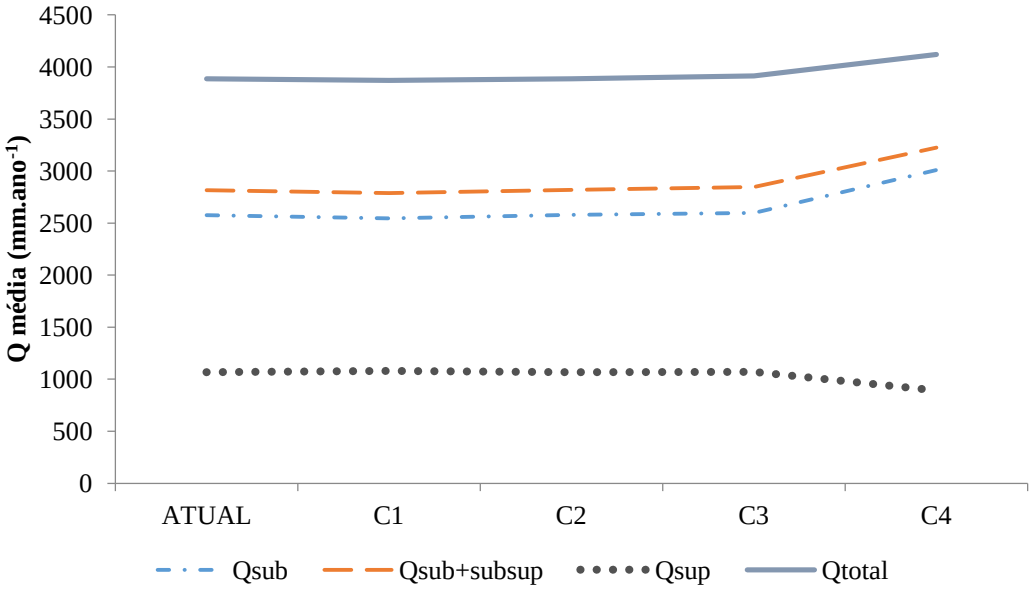


Figura 34 – Origem da vazão média simulada na condição atual e cenários de uso do solo para a sub-bacia Vargem do Cervo. (Qsub: escoamento subterrâneo, Qsub+subpsup: escoamento subterrâneo+subsuperficial, Qsup: escoamento superficial, Q: escoamento total.)

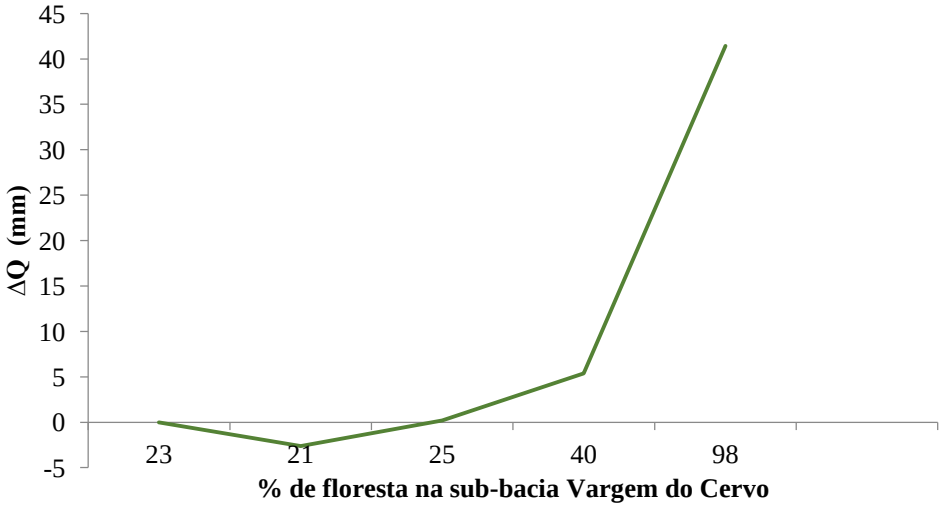


Figura 35 – Variação do escoamento total em relação a cobertura florestal.

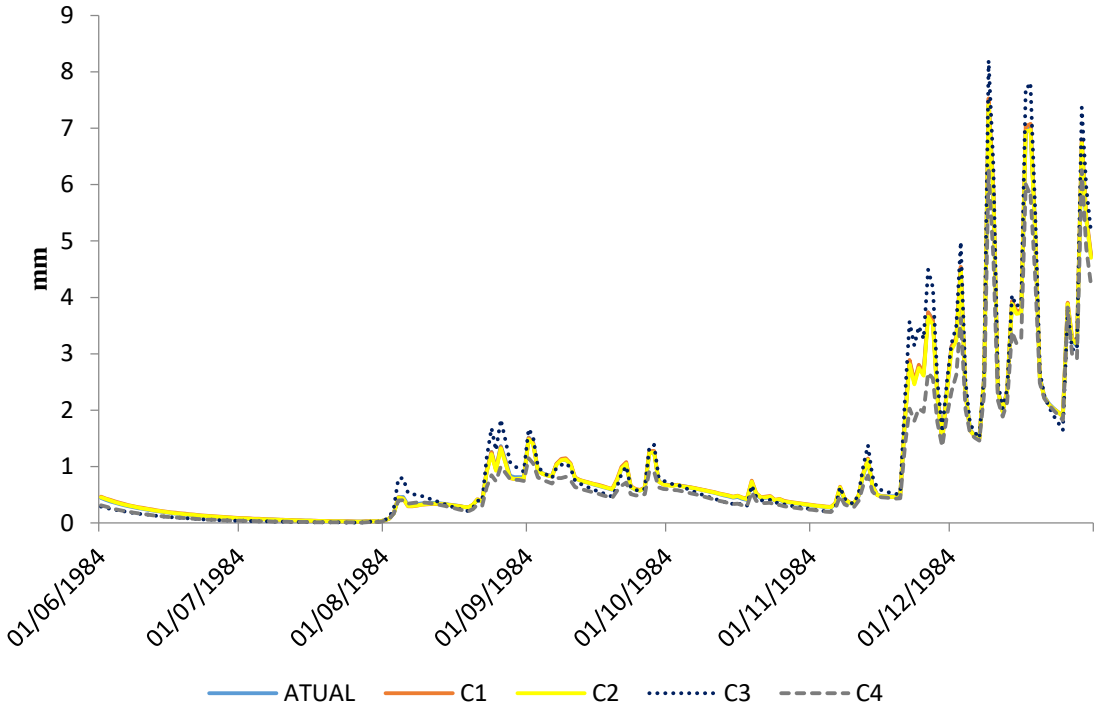


Figura 36 – Escoamento superficial nos diferentes cenários aplicados a sub-bacia Vargem do Cervo.

Tanto os resultados das simulações para a bacia do Sapucaí quanto para a sub-bacia Vargem do Cervo foram considerados atípicos e parcialmente contraditórios a literatura; motivando uma investigação mais cuidadosa, que resultou em novas simulações com modificação no parâmetro resistência superficial (**r_s**). Os resultados são abordados separadamente no item 5.3.4 a seguir e discutidos no item 6.2.1.

5.3.4. SIMULAÇÕES COM VALOR FIXO DA RESISTÊNCIA SUPERFICIAL (r_s)

Considerando a **r_s** um parâmetro de difícil obtenção e ampla faixa de valores para diferentes tipos de vegetação de acordo com Bayer (2014), optou-se por considerar o valor de **r_s** fixo em 60 para a classe de uso "agropecuário" e "floresta". Assim, os resultados para a bacia do Sapucaí como um todo e para a sub-bacia Vargem do Cervo refletiram o comportamento esperado, de acordo com a literatura já mencionada.

As hidrógrafas de vazões observada e simulada para o cenário atual estão satisfatoriamente ajustadas, sendo que a vazão simulada tende a apresentar picos mais altos, o que pode ser observado na Figura 37.

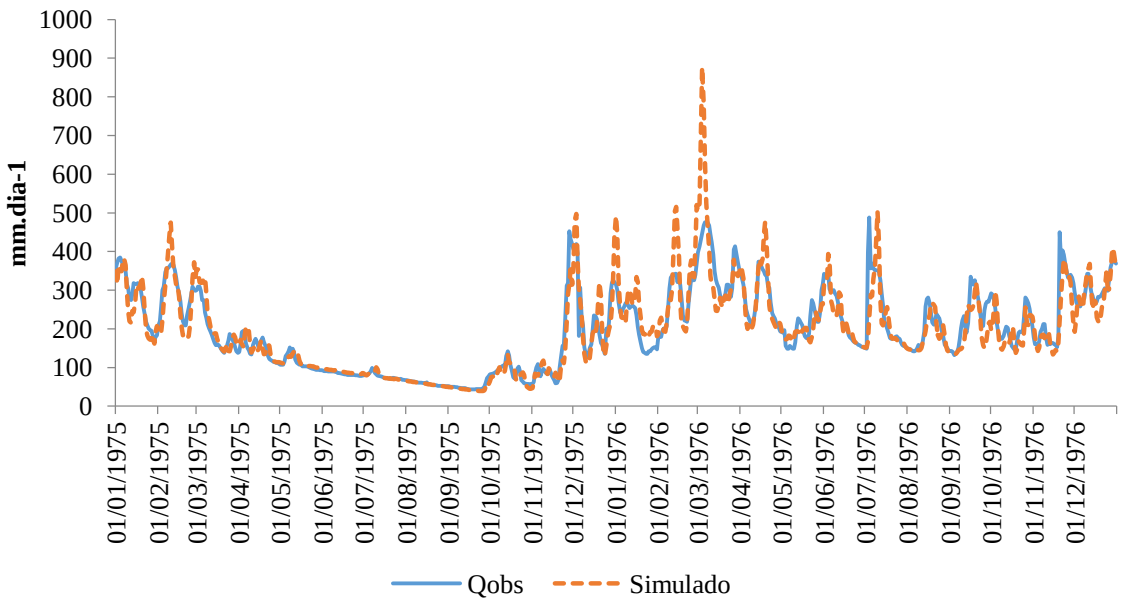


Figura 37 – Vazão observada e simulada para a bacia do Sapucaí com valor de $\mathbf{r_s}$ fixo.

Com relação aos cenários de uso do solo aplicados a bacia do Sapucaí, o cenário 3 (C3) apresentou sensível redução das vazões em relação ao cenário atual, especialmente nos picos, conforme a Figura 38.

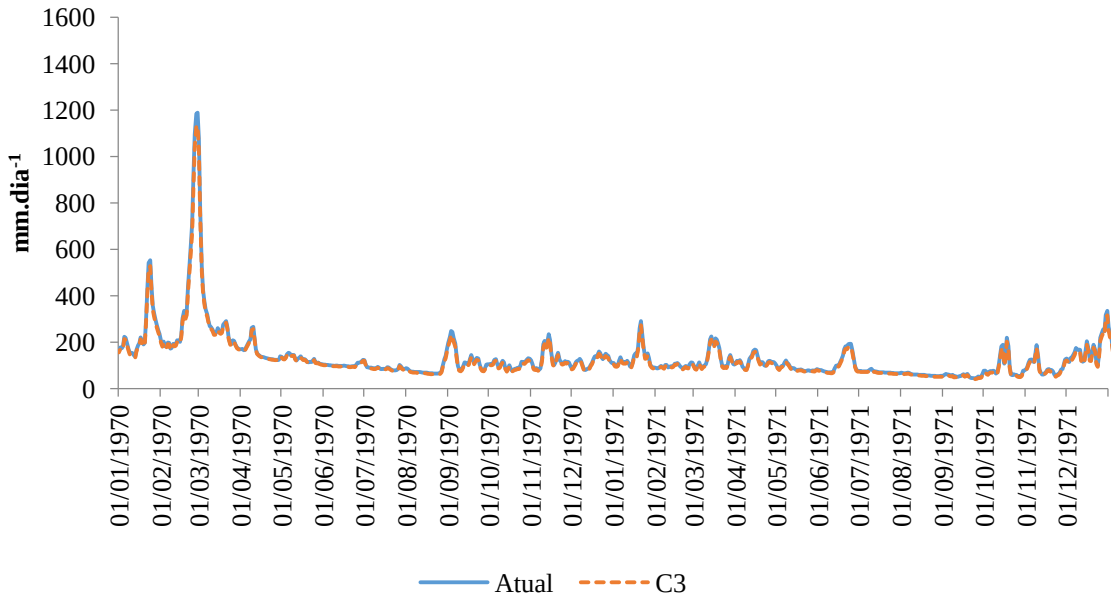


Figura 38 – Vazões simuladas no cenário atual e C3 na bacia do Sapucaí.

Na sub-bacia Vargem do Cervo verificou-se expressiva redução das vazões no C4 em relação ao cenário atual, especialmente nos picos, conforme Figura 39.

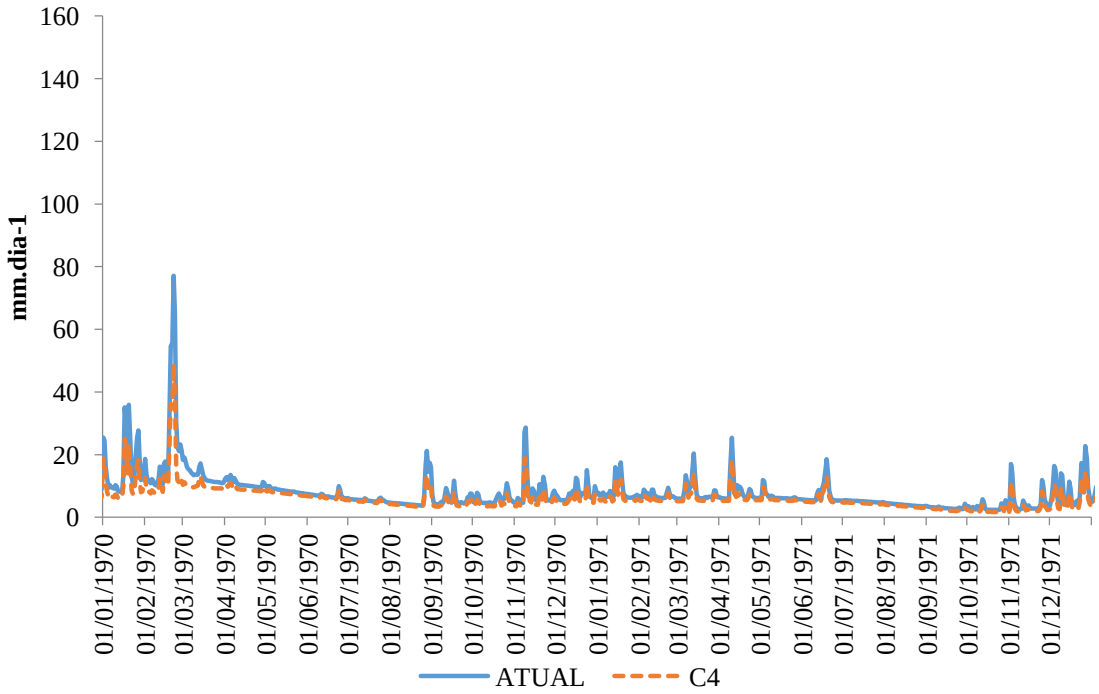


Figura 39 - Vazões simuladas no cenário atual e C4 na sub-bacia Vargem do Cervo.

6. DISCUSSÃO

6.1. MAPEAMENTO DAS ÁREAS DE PRESERVAÇÃO PERMANENTE – APP E CONFLITOS DE USO DO SOLO

O mapeamento das APP de topo de morro para a bacia do rio Sapucaí de acordo com a legislação revogada e a vigente apresentou resultados coerentes com os estudos conduzidos por Soares-Filho et al. (2014), Cunha et al. (2015), Koumrouyan (2015) e Teixeira (2015). Soares-Filho et al. (2014) identificaram que a redução desta categoria de áreas protegidas chega a 87%, considerando todo o território nacional. Cunha et al. (2015) estudou uma bacia na região sul do Brasil e também encontrou drástica redução desta categoria de APP, da ordem de 89%. Koumrouyan (2015) conduziu estudo semelhante na bacia do rio Verde, vizinha a BRS e, embora a metodologia empregada tenha sido um pouco distinta desta, reporta-se também a redução de 99 % nas APP de topo de morro mapeadas de acordo com as

referidas leis. Teixeira (2015) verificou a redução de 87% nesta categoria de APP para a bacia do rio Cacaria, em Piraí-RJ.

As falhas técnicas relativas ao mapeamento automático dessas áreas que persistem no Código vigente são apontadas por alguns autores (KOUMROUYAN, 2015; OLIVEIRA, 2015) e setores técnicos de órgãos ambientais estaduais (INEA, 2014) que destacam: a subjetividade quanto ao método utilizado para mensurar a declividade e a escala em que o mapeamento deve ser feito. Falhas técnicas graves, uma vez que a Lei 12.651/2012 é uma norma federal recente e a mais abrangente sobre o tema. Ademais, o período de sua elaboração foi marcado por diversas discussões e estudos da comunidade acadêmica capazes de suprir o aparato técnico da mesma (SILVA et al., 2012), se houvesse tal interesse.

A diferença percentual nas áreas protegidas definidas pela resolução revogada e pela lei vigente, ainda que expressiva, é um percentual bem pequeno da bacia, 0,77% representam as APP de topo de morro no C2. Esses topos de morro preservados, no contexto das microbacias onde se localizam, favoreceriam a infiltração da água e reduziriam as perdas de solo por erosão (CALDER, 1993). Do ponto de vista da conservação florestal, promoveriam maior conexão entre os remanescentes, favorecendo a biodiversidade genética da flora e fauna; aumentando as chances de conservação desses recursos no longo prazo (TAMBOSI et al. 2015).

Embora esses remanescentes florestais sejam protegidos pela Lei da Mata Atlântica, Lei 11.428/2006 (BRASIL, 2006), e a possibilidade de supressão dependa de anuência da Secretaria de Estado de Meio Ambiente, na prática, há redução do amparo legal para essas áreas (OLIVEIRA, 2015). Gerdenits et al. (2007) identificou 8097 ha de APP (todas as categorias) com uso do solo irregular, sendo que parte de sua área de estudo ocupa a porção sul da bacia rio Sapucaí.

Dados do Cadastro Ambiental Rural (CAR) apontam que pelo menos 22, 2 Mha (milhões de hectares) de áreas protegidas (APP) não tem cobertura vegetal nativa, são áreas que foram desmatadas que deveriam estar protegidas (GIRARDI, 2016) e, de acordo com o Código vigente, se o desmatamento ocorreu antes de 2008, a área é considerada de “uso consolidado” e não necessita ser recuperada.

A redução de áreas florestais nos topos de morros pode interferir em processos hidrológicos em bacias hidrográficas de pequena a grande escala e em diversos tipos de usos dos recursos hídricos, tais como a redução da vazão de nascentes e aumento da vazão nos rios.

O aumento do escoamento superficial favorece a formação de processos erosivos, deslizamentos, perda de solo e enchentes (CALDER, 1993).

A Procuradoria Geral da União questionou a constitucionalidade de artigos do Novo Código Florestal que remetem, entre outros temas, às perdas ambientais relativas à vegetação de margens de curso d'água e aos desmatamentos anteriores a 2008 anistiados (AGÊNCIA SENADO, 2015). Não há, no entanto, questionamento ou parecer sobre a nova definição de APP de topo de morro e a drástica redução de áreas protegidas decorrente desta.

Considerando ainda que a maior parte dos remanescentes florestais esteja localizada nas áreas montanhosas da bacia, especialmente na Serra da Mantiqueira, ressalta-se a importância e vulnerabilidade dessas formações florestais de alta biodiversidade (DRUMMOND, 2005). Relevantes e recentes estudos de Pompeu (2015) e Souza et al. (2016) demonstram a capacidade das florestas nebulares ou altomontanas de interceptar a água das nuvens, favorecendo o aporte hídrico para os compartimentos inferiores do dossel e consequentemente, para o ciclo hidrológico local. Ambos os estudos foram realizados na Serra da Mantiqueira, sendo que o primeiro apresenta a distribuição geográfica destas formações florestais e o segundo quantifica a precipitação dentro e fora da floresta. Pompeu (2015) verificou que as formações nebulares se distribuem por grandes extensões na Mantiqueira, em áreas não legalmente protegidas por Unidades de Conservação. Mais uma vez, a atual definição das APP de topo de morro não contribui para a proteção dessas áreas. De acordo com Souza et al. (2016) a precipitação dentro da floresta correspondeu a 86% da precipitação incidente; além de verificarem eventos de precipitação interna na ausência de chuva e interceptação negativa, fenômenos comuns em florestas nebulares.

6.2. SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA

As mudanças de uso do solo dos cenários C1, C2 e C3 não provocaram alterações significativas no regime hidrológico da bacia do rio Sapucaí na escala em que foram analisados, provavelmente porque as modificações de 5%, 0,5% e 9,6%, respectivamente, são pouco representativas no contexto de área total da bacia. De acordo com Bosch e Hewleet (1982), modificações no uso do solo inferiores a 20% da área bacia são difíceis de serem percebidas em simulações hidrológicas, devido às incertezas inerentes aos métodos hidrométricos. Estes estudos, entretanto, foram conduzidos em bacias de pequena escala.

Caram (2011) utilizando o MGB-IPH para avaliar o impacto hidrológico das modificações no uso do solo verificou incremento nas vazões máxima, média e mínima diante de cenário que considerou cobertura florestal em 100% e de 100% por agricultura em relação ao atual, na bacia do rio Piracicaba, região próxima a BRS. Para a conversão da bacia em 100% de área de pastagem, a mesma autora verificou redução nas vazões.

Koumrouyan (2015) aplicou o DHVSM a bacia do rio Verde, vizinha à leste da BRS em diferentes cenários de cobertura florestal e verificou que a vazão média foi estatisticamente reduzida apenas entre os cenários em que o incremento de floresta foi de 16% em relação a área total da bacia ou com a bacia totalmente coberta por floresta nativa. Viola (2011) estudando as alterações no uso do solo no alto rio Grande, incluindo a BRS, aplicou o modelo LASH e verificou que conversões de floresta em pastagem na ordem 30% e 70% dos fragmentos remanescentes provocariam aumento das vazões máximas em 15% e 43%, respectivamente.

Bayer e Collischon (2013), com o objetivo de verificar a sensibilidade do MGB-IPH às mudanças no uso do solo, simularam alterações em três bacias distintas do Brasil, que envolveram a conversão progressiva de floresta em pastagem para área total das bacias. Estes autores verificaram que todas as bacias apresentaram aumento de escoamento com o desmatamento (244 – 344 $mm.ano^{-1}$), a interceptação foi drasticamente reduzida (81 %) e os valores de evapotranspiração foram coerentes com a literatura de estudos conduzidos em bacias pareadas; o que atestou a capacidade do MGB-IPH em representar de forma satisfatória os efeitos do desmatamento.

Considerando a sub-bacia Vargem do Cervo, em que se propôs também o C4 que tem a maior cobertura florestal e portanto, a maior alteração na área da sub-bacia, foi possível verificar alterações no regime hidrológico. De forma geral, verificou-se o incremento na vazão total com o aumento da cobertura florestal (Tabela 6); o que está de acordo com os resultados de Caram (2011), mas contrário a maior parte dos estudos que indica aumento da vazão com a substituição de florestas nativas por áreas agrícolas (CHENG; LI; LU, 2002; BAYER; COLLISCHON, 2013; KOUROUYAN, 2015; YIARA et al. 2016).

A análise da origem do escoamento, entretanto, mostrou expressivo aumento da quantidade de água no solo (W_{BM}) e do escoamento subterrâneo (Qsub) nos cenários C3 e C4, que tem maior cobertura florestal (Tabela 6; Figura 33, Figura 34 e Figura 35). A maior capacidade de solos sob floresta em armazenar água da chuva justifica-se pelas condições

favoráveis de infiltração proporcionadas pelas raízes, aumento dos macroporos e matéria orgânica, que favorecem a percolação (CHENG, LI; LU, 2002). Teixeira (2015) verificou em topos de morro na baixada fluminense que solos sob capoeira apresentaram condutividade hidráulica (**K_{sat}**) superior a solos sob pastagem, nas camadas superiores (12,5 cm). Fato atribuído ao uso do solo, uma vez que a **K_{sat}** é função das condições físicas do solo, como estrutura, porosidade e compactação (TEIXEIRA, 2015). Importante ressaltar que sub-bacia Vargem do Cervo apresenta, em sua maior parte, solos agrupados nas classes A e B, que denotam solos profundos e bem drenados. Sabe-se que o escoamento subterrâneo tem importante contribuição no cômputo do escoamento total e ainda que existam dificuldades em separar em fluxos; estudos na bacia do rio Grande conduzidos por Viola, Mello e Silva (2007) *apud* Viola (2011) verificaram que a contribuição do escoamento subterrâneo pode chegar a 75% do escoamento total.

No C3 e C4 verificou-se, ainda, a redução do escoamento superficial (Qsup), conforme Figura 19; o que está de acordo com a literatura. Cheng, Lin, Lu (2002) destacam a capacidade de armazenamento de água em solos florestais e os benefícios das florestas nas regiões de cabeceira das bacias em Taiwan, que incluem redução do escoamento superficial e de processos erosivos nesta região que possui encostas íngremes e solos rasos.

Com relação a interceptação, os valores encontrados neste estudo concordam com os de Bayer; Collischon (2013), sendo que as lâminas de interceptação (α) nos cenários com ausência e presença da cobertura florestal (em área total) apresentaram valores próximos. Enquanto α média das três sub-bacias avaliadas por Bayer; Collischon (2013) apresentaram variação de 80%, este estudo verificou o aumento de quase 50% no cenário com a maior cobertura florestal na sub-bacia Vargem do Cervo (Tabela 6).

A evapotranspiração estimada para o uso atual na sub-bacia apresentou valores inferiores, porém próximos, a estudos que mediram esta variável em florestas atlânticas na região sudeste e sul da Bahia, Brasil (CICCO, 2009; ALMEIDA SOARES). Cardoso et al. (2006) registrou evapotranspiração de 839 mm/ano em florestas nativas de Nova Nova Friburgo-RJ. No entanto, não se verificou o aumento da evapotranspiração com o aumento da cobertura florestal, o que seria esperado.

Conforme já mencionado no item resultados, a redução da evapotranspiração nos cenários com maior cobertura florestal não condiz com os resultados da literatura, o que gerou

o aumento da vazão nestes cenários e não a redução. O item a seguir discute a realização de novas simulações com valor fixo de $\mathbf{r_s}$.

6.2.1. SIMULAÇÕES COM VALOR FIXO DA RESISTÊNCIA SUPERFICIAL (r_s)

A $\mathbf{r_s}$ adotada nas primeiras simulações foi estabelecida conforme dados de literatura e para a classe agropecuária variou de 40 a 60; para florestas adotou-se o valor 100. Com o aumento da cobertura florestal nos cenários (especialmente C3 e C4), a resistência maior que pode explicar a redução da evapotranspiração, sobrepondo o peso deste parâmetro aos demais relacionados ao uso do solo – altura da vegetação, albedo e IAF.

Bayer (2014) reporta a grande incerteza associada ao parâmetro $\mathbf{r_s}$ e adota o valor fixo de 60 para os usos floresta e pastagem, o que permitiu verificar as diferenças no uso do solo expressa nos demais relacionados ao uso do solo. Fator que contribui para as incertezas relacionadas a medida de $\mathbf{r_s}$ e ampla faixa de valores reportados na literatura é o fato de ser um parâmetro fisiológico, dependente das condições de umidade do solo e de fatores climáticos – temperatura, incidência de radiação, velocidade do vento.

7. CONCLUSÃO

O mapeamento adequado das APP de topos de morro exige bom conhecimento do analista em SIG, ainda que utilize uma rotina automatizada. Atentar-se a fonte e resolução do MDE, assim como às adequações entre a lei revogada e a vigente é de suma importância para gerar informações com confiança, para embasamento de análise comparativa.

Em um contexto mundial de mudanças climáticas e escassez de recursos naturais, o artigo que apresenta as definições de APP de topo de morro no Código vigente carece de revisão, assim como outros artigos já considerados inconstitucionais por juristas.

Os cenários hipotéticos baseados nas definições de APP de topo de morro não apresentaram impactos hidrológicos para a bacia na escala em que foram analisados. É preciso, no entanto, compreender o grau de incertezas acumuladas em estudos de simulação hidrológica, considerando as limitações próprias da modelagem, o efeito de escala e a qualidade de dados hidrométricos e climatológicos; especialmente no que se refere à localização e operação das estações de monitoramento.

As simulações com valor fixo de $\mathbf{r_s}$, entretanto, apresentaram resultados de acordo com literatura, em que cenários com maior cobertura florestal apresentam redução nas vazões. O que indica a necessidade de se explorar mais o efeito deste parâmetro, bem como aos demais relacionados à água armazenada no solo para melhor capacidade de avaliação de cenários que alterem a cobertura florestal das bacias.

8. REFERÊNCIAS

AGÊNCIA SENADO. Notícias: PGR questiona constitucionalidade do novo Código Florestal. Disponível em: <http://www12.senado.leg.br/noticias/materias/2013/01/22/pgr-questiona-constitucionalidade-do-novo-codigo-florestal>. Acesso em: dez. 2015.

AMADO, F. A. Di T. **Direito Ambiental Esquematizado**. 5 ed. Rio de Janeiro: Forense; São Paulo: Método, 2014.

ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (BRASIL). Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil: Informe 2014. Brasília: **ANA**, 2015. 103 p.

ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (BRASIL). Plataforma Hidroweb: portal de informações hidrológicas. Disponível em: < http://www.snirh.gov.br/hidroweb/>. Acesso em: mar. 2016.

ANDRADE, M. A.; MELLO, C. R.; BESKOW, S. Simulação hidrológica em uma bacia representativa dos Latossolos na região do Alto Rio Grande, MG. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, n. 1, p. 60-76, 2013.

ANDRÉASSIAN, V. Waters and forests: from historical controversy to scientific debate. **Journal of Hydrology**, v. 291, p. 1-27, 2004.

ARASATO, L. S.; AMARAL, S.; XIMENES, A. C. Densidade de Drenagem e HAND (Height Above the Nearest Drainage) do SRTM para modelagem de distribuição de espécie de palmeiras no Brasil. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR, XIV, Natal, RN. **Anais eletrônicos**... São José dos Campos, SP: INPE, 2009. p. 5089-5097. Disponível em: <http://urlib.net/dpi.inpe.br/sbsr@80/2008/11.17.20.42.48>.

BARBOSA JUNIOR, 2016. Elementos de hidrologia aplicada. Departamento de Engenharia Civil. Universidade Federal de Ouro Preto. Disponível em: <www.em.ufop.br/deciv/departamento/~antenorrodrigues/3%20Precipitacao.pdf>

BAYER, D. M. Efeito das mudanças de uso da terra no regime hidrológico de bacias de grande escala. Tese de doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. UFRGS. 2014.

BAYER, D. M.; COLLISCHONN, W. Análise de Sensibilidade do Modelo MGB-IPH a Mudanças de uso da Terra. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.18, n.3, 2013.

BESKOW, S.; MELLO, C. R.; NORTON, L. D.; CURI, N.; VIOLA, M. R.; AVANZI, J.C. Soil erosion prediction in the Grande River Basin, Brazil using distributed modeling. **Catena**, v. 79, p. 49–59, 2009.

BESKOW, S.; MELLO, C. R.; NORTON, L. D.; SILVA, A. M. Performance of a distributed semi-conceptual hydrological model under tropical watershed conditions. **Catena**, v.86, p.160-171, 2011.

BEST, A. et al. A critical review of paired catchment studies with reference to seasonal flow and climatic variability. Technical Report 25/03, 2003. Disponível em: <htttp://www.clw.csiro.au/publications/technical2003/tr25-03.pdf.> Acesso em 10 abr. 2016.

BONUMÁ, N. B.; ROSSI, C. G.; ARNOLD, J. G.; REICHERT, J. M.; PAIVA, E. M. C. D. Hydrology evaluation of the soil and water assessment tool considering measurement uncertainty for a small watershed in southern Brazil. **Applied Engineering in Agriculture**, v. 29 (2), p. 189-200, 2013. American Society of Agricultural and Biological Engineers ISSN 0883-8542

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, p. 3 – 23, 1982.

BRASIL. Portal Brasil: Meio Ambiente / Matriz energética. Disponível em: <http://www.brasil.gov.br/meio-ambiente/2010/11/matriz-energetica>. Acesso em 5 dez. 2015.

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

BRUIJNZEEL, L. A. Hydrology of moist tropical forest and effects of conversion: state of knowledge review. UNESCO International Hydrologic Programme / Netherlands IHP. Amsterdam: 1990.

BRUIJNZEEL, L. A.; MULLIGAN, M.; SCATENA, F. N. Hydrometeorology of tropical montane cloud forests: emerging patterns. **Hydrological Process**, v. 25, 2011, p. 465–498.

BRUIJNZEEL, L. A.; SCATENA, F. N.; HAMILTON, L. S. (Ed.) Tropical Montane Cloud Forests: Science for Conservation and Management. **Cambridge University Press.** 2011.

CARAM, R. O. Mudanças no uso do solo e resposta hidrológica na bacia do rio Piracicaba. Tese de doutorado em Ciências / Irrigação e Drenagem. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz – ESALQ/USP. Piracicaba, 2011.

CASTRO, P. S. Bacias de Cabeceiras: verdadeiras caixas d`água da natureza. **Ação Ambiental**, Viçosa, v.1, n.3, p.9-11, 1999.

CHENG, J.D.; LIN, L.L.; LU, H.S. Influences of forests on water flows from headwater watersheds in Taiwan, **Forest Ecology and Management**, v. 165, p. 11-28, 2002.

COLLISCHONN, W. Simulação Hidrológica de Grandes Bacias. Tese de doutorado em Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre: UFRGS, 2001.

COLLISCHONN, W.; ALLASIA, D.; SILVA, B. C.; TUCCI, C. E. M. The MGB-IPH model for large-scale rainfall–runoff modeling. **Hydrological Sciences Journal**, v. 52 (5), p. 878-895, 2007.

COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. Simulação Hidrológica de Grandes Bacias. 2001. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 6, n. 1. 2001.

COPASA. Plano diretor de recursos hídricos da bacia hidrográfica do rio Sapucaí: diagnóstico e prognóstico. 2010. Disponível em: <http://www.cbhsapucai.org.br/cbh/Pagina.do?idSecao=53>. Acesso em: 12 jan. 2016.

CORTIZO, S. Proposta de nova redação para a Resolução CONAMA nº 303/02, no que se refere a topos de morro, montanha e linha de cumeada. In: 3º GT Definição dos conceitos de 'topo de morro' e de 'linha de cumeada' referidos na Resolução CONAMA nº 303/02. 20 de agosto de 2008. Disponível em: <www.mma.gov.br/port/conama/processos/FBF21C00/topo1.pdf>.

CUNHA, H. N.; NÓBREGA, M. R. R.; FIORI, D.; ALBA, J. M. F.; MIURA, A. K.; SALDANHA, D. L. Mapeamento de áreas de preservação permanente de topo de morro na bacia hidrográfica do Alto Camaquã, RS, nos termos da resolução CONAMA de 2002 (revogado) e do Novo Código Florestal de 2012. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR, João Pessoa, PB. INPE. **Anais eletrônicos**... São José dos Campos, SP: INPE, 2015. p. 6826 – 6832.

CURI, N.; MARQUES, J. J. G.; MARQUES, A. F. S. M.; FERNANDES, E. I. Solos, geologia, relevo e mineração. In: SCOLFORO, J. R. S.; OLIVEIRA, A. D.; CARVALHO, L. M. T. (Ed.). **Zoneamento ecológico-econômico do Estado de Minas Gerais: zoneamento e cenário exploratórios**. Lavras: Editora UFLA, 2008. p. 73-88.

DOBOS, E.; MICHELI, E.; BAUMGARDNER, M.F.; BIEHL, L.; HELT, T. Use of combined digital elevation model and satellite radiometric data for regional soil mapping. **Geoderma**, v.97, p.367-391, 2000.

DRUMMOND, G. M. et al. (org.). **Biodiversidade em Minas Gerais: um atlas para sua conservação**. 2 ed. Belo Horizonte: Fundação Biodiversitas, 2005. 222 p.

ESRI – Environmental Systems Research Institute. Arc Gis / Arc Map. Versão livre / Free Trial. 2014. Disponível em: <http://www.esri.com/apps/Products/ArcGIS/v10_1/eval/press/index.cfm?event=evaluate.index&bookid=8>. Acesso em: 2 maio 2015.

FAN, F.; COLLISCHONN, W.; BUARQUE, D.; PAIVA, R. C.; KAYSER, R. Manual de definição de unidades de resposta hidrológica (blocos) do modelo MGB-IPH. Manual 03/05. Versão 2.0. Porto Alegre: IPH/UFRGS, 2010.

FÉLIX, V. S.; PAZ, A. R. Representação dos processos hidrológicos em bacia hidrográfica do semiárido paraibano com modelagem hidrológica distribuída. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 21, n. 3, p. 556-569, 2016.

GIRARDI, G. Terras privadas têm 30% menos floresta do que deveriam. Coluna Sustentabilidade. Estadão. Disponível em: <http://sustentabilidade.estadao.com.br/blogs/ambiente-se/analise-preliminar-aponta-deficit-de-30-de-reserva-legal-no-pais/>. Acesso em: 10 out. 2016.

HOTT, M. C.; GUIMARÃES, M.; MIRANDA, E. E. Método para determinação automática de Áreas De Preservação Permanente em topos de morro do Estado de São Paulo, com base em geoprocessamento. **Embrapa Monitoramentos por Satélite**. Documentos, 34. 2004.

HOTT, M. C.; GUIMARÃES, M.; MIRANDA, E. E. Um método para a determinação automática de áreas de preservação permanente em topos de morros para o Estado de São Paulo. *In*: XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR,

Goiânia, GO, 2005. **Anais eletrônicos...** São José dos Campos: INPE, 2005. p. 3061-3068. Disponível em: <http://marte.sid.inpe.br/col/ltid.inpe.br/sbsr>.

IGAM – Instituo Mineiro de Gestão das Águas. Disponível em: <http://www.igam.mg.gov.br/component/content/150?task=view>. Acesso em: 9 dez. 2015.

IGAM – Instituo Mineiro de Gestão das Águas. Portal Infohidro: mapoteca. Disponível em: <http://portalinfohidro.igam.mg.gov.br/mapas-e-bases-cartograficas>. Acesso em: 9 dez. 2015b.

INPE. Modelo Hidrológico Distribuído MDH – INPE: Manual de implementação v. 1.0. Cachoeira Paulista, SP: INPE, CCST, 2016.

Instituto Estadual do Ambiente (INEA). Noções básicas de determinação de APP de topo de morro. Diretoria de Licenciamento Ambiental. 2014. Disponível em: <http://pt.slideshare.net/rtr_rtr/determinao-de-app-topo-de-morro>.

KOUMROUYAN, A. Desenvolvimento de cenários de cobertura da terra em uma bacia de mesoescala na mata atlântica e análise de respostas hidrológicas simuladas pelo modelo DHSVM. Tese de doutorado em Ciência do Sistema Terreste. São José dos Campos: INPE, 2015.

LIMA, W. DE P.; ZAKIA, M. J. B. Hidrologia de matas cilia-res. In: RODRIGUES, R. R.; LEITÃO FILHO, H. de F. (Eds.). **Matas ciliares: conservação e recuperação**. São Paulo: USP/FAPESP, 2000. cap. 3, p.33-44

LORENZON, T. H.; PAIVA, S. L. P.; NEVES, S. M. A. S.; NEVES, R. J.; NUNES, E. S. Geotecnologias aplicadas à análise do estado de conservação das APPs das nascentes da bacia hidrográfica do rio Cabaçal, Mato Grosso – Brasil. In: 5º Simpósio de Geotecnologias no Pantanal, Campo Grande, MS, 2014. **Anais eletrônicos...** Campo Grande, MS: EMBRAPA INFORMÁTICA AGROPECUÁRIA / INPE, 2014. p. 415 -425. Disponível em: <http://www.geopantanal.cnptia.embrapa.br/2014/cd/p67.pdf>. Acesso em: 20 jun. 2015.

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

MEDIONDO, E. M.; TUCCI, C. E. M. 1997. Escalas hidrológicas I: Conceitos. **Revista Brasileira de Recurso Hídricos**. v.2, n.2, . 21-44. 1997.

MELLO, C. R.; ÁVILA, L. F.; VIOLA, M. R.; CURI, N.; NORTON, L. D. Assessing the climate change impacts on the rainfall erosivity throughout the twenty-first century in the Grande River Basin (GRB) headwaters, Southeastern Brazil. **Enviromental Earth Sciences**, v. 73, p. 8683 – 8698. 2015.

MENDONÇA, L. A. R.; VASQUÉZ, M. A. N.; FEITOSA, J. V.; OLIVEIRA, J. F.; FRANCA, R. M.; VÁSQUEZ, E. M. F.; FRISCHKORN, H. Avaliação da capacidade de infiltração de solos submetidos a diferentes tipos de manejo. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v.14, n.1, p. 89-98, 2009.|

MENEZES, M.D.; JUNQUEIRA JÚNIOR, J.A.; MELLO, C.R.; SILVA, A.M.; CURI, N. & MARQUES, J.J. Dinâmica hidrológica de duas nascentes, associada ao uso do solo, características pedológicas e atributos físico-hídricos na sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Lavrinha - Serra da Mantiqueira (MG). **Scientia Forestalis., Piracicaba, v. 37, n. 82, p. 175-184, jun. 2009**

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE – MMA. Dados geográficos. Disponível em: <http://mapas.mma.gov.br/i3geo/datadownload.htm>. Acesso em: abr. 2016

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE – MMA. Plano Nacional de Recursos Hídricos. Síntese Executiva - português / Ministério do Meio Ambiente, Secretaria de Recursos Hídricos. - Brasília: MMA, 2006. 135p.

MINISTÉRIO PÚBLICO DO ESTADO DE SÃO PAULO, MPSP. Demonstrativos de perdas ambientais. Retrocesso na Proteção Ambiental: Dispositivos Lei nº 12.651/2012. Transparência, 2012. Disponível em: <http://www.mpsp.mp.br/portal/page/portal/projeto_florestar/Programa_diagnosticos/material-apoio/Ap_Lei_12651-Dec_7830-Versao-22-02-2012-Divulgacao-Externa.pdf>. Acesso em: 20 set. 2016.

MMA - Ministério do Meio Ambiente. Convenção do Quadro das Nações Unidas sobre o Clima: Acordo de Paris. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/clima/convencao-das-nacoes-unidas/acordo-de-paris>. Acesso em: nov. 2016.

NEITSCH, S. L.; ARNOLD, J. G.; WILLLIAMS, J. R. Soil and water assessment tool: Theoretical documentation - Versão 2009. Temple: **Agricultural Research Service (USDA) e Texas Agricultural Experiment Station (Texas AeM University)**. 2011. 634 p.

NERY, C. V. M.; BRAGA, F. L.; MOREIRA, A. A.; FERNANDES, F. H. S. Aplicação do Novo Código Florestal na Avaliação das Áreas de Preservação Permanente em Topo de Morro na Sub-Bacia do Rio Canoas no Município de Montes Claros, MG. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 6, n. 6, p. 1673-1688, 2013.

NIRAULA, R.; MEIXNER, T.; NORMAN, L. M. 2015. Determining the importance of model calibration for forecasting absolute / relative changes in streamflow from LULC and climate changes. **Journal of Hidrology**, n.522, 439-451, 2015.

NOBRE, A. D.; CUARTAS, L. A.; HODNETT, M.; RENNÓ, C. D.; RODRIGUES, G.; SILVEIRA, A.; WATERLOO, M.; SALESKA, S. Height above the Nearest Drainage, a hydrologically relevant new terrain model. **Journal of Hydrology,** v. 404, n. 1-2, p. 13–29, 2011.

NOWATZKI, A.; SANTOS, L. J. C.; PAULA, E. V. Utilização do SIG na delimitação das áreas de preservação permanente (APP's) na Bacia do Rio Sagrado, Morretes, PR. **Sociedade & natureza (UFU Online)**, v. 22, p. 121-134, 2010.

OLIVEIRA, G. C. Precisão de modelos digitais de terreno, mapeamento automático de APPs em topos de morros e a eficácia do novo código florestal. Dissertação (Mestrado em Solo e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2015. Disponível em: <http:\\www.locus.ufv.br/handle/123456789/645>.

OLIVEIRA, G. C.; FERNANDES FILHO, E. I. Automated mapping of permanent preservation areas on hilltops. **Cerne,** Lavras, v. 22, n. 1, p. 111-120, mar. 2016 .

OLIVEIRA, G. C.; FERNANDES FILHO, E. I. Metodologia para delimitação de APPs em topos de morros segundo o novo Código Florestal brasileiro utilizando sistemas de informação geográfica. In: XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Foz do Iguaçu, PR, 2013. **Anais…** Foz do Iguaçu, PR : INPE, 2013. p. 4443-4450, 2013.

OLIVEIRA-FILHO, A. T.; FONTES, M. A. L. Patterns of floristic differentiation among Atlantic forests in Southeastern Brazil and the influence of climate. **Biotropica**, Washington, v. 32, n. 4b, p. 793-810, 2000.

ONU. Organização das Nações Unidas no Brasil. “Brasil ratifica Acordo de Paris sobre o clima.” Publicado em: 13/09/2016. Disponível em: <https://nacoesunidas.org/brasil-ratifica-acordo-de-paris-sobre-o-clima/>

PELUZIO, T. M. O.; SANTOS, A. R.; FIEDLER, N. C. (orgs.) Mapeamento de áreas de preservação permanente no ArcGis 9.3. Alegre: CAUFES, 2010. Disponível em: <http://www.mundogeomatica.com.br/mapeamentoappsarcgis93.htm>.

PERAZZOLI, M.; PINHEIRO, A.; KAUFMANN, V. Efeitos de cenários de uso do solo sobre o regime hídrico e produção de sedimentos na bacia do ribeirão Concórdia, SC. **Revista Árvore,** Viçosa, v.37, n.5, p.859-869, 2013.

PINTO, D. B. F.; SILVA, A. M.; MELLO, C. R.; COELHO, G. Qualidade da água do Ribeirão Lavrinha na região do alto rio Grande, Minas Gerais, Brasil. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 33, n. 4, p. 1145-1152, Lavras, 2009.

POMPEU, P. V. Modelagem da distribuição das florestas atlânticas nebulares na Serra da Mantiqueira. Tese de doutorado em Engenharia Florestal. Universidade Federal de Lavras - UFLA. Lavras, 2015.

RANZINI, M.; DONATO, C. F.; ARCOVA, F. C. S.; CICCO, V. Geração de deflúvio em uma microbacia de Mata Atlântica, em Cunha – SP. Revista do Instituto Florestal, v. 23, n. 2, p. 179 – 190, 2011.

RANZINI, M.; RIGHETO, A. M.; LIMA, W. P.; GUANDIQUE, M. E. G.; ARCOVA, F. C. S.; CICCO, V. Processos hidrológicos de uma microbacia com Mata Atlântica, na região da Serra do Mar, SP. **Scientia Florestalis**, n. 66, p. 108 – 119. IPEF: 2004.

RENNÓ, C. D.; SOARES, J. V. Modelos hidrológicos para gestão ambiental. Relatório técnico parcial. São José dos Campos: MCTI/INPE, 2000.

RIBEIRO, B. T. Energia cinética de gotas de chuva simulada e energia ultra-sônica na desagregação de um cambissolo. Dissertação de mestrado. Lavras: UFLA, 2006.

RIBEIRO, C. A. A. S.; SOARES, V. P.; OLIVEIRA, A. M.; GLERIANI, J. M. O desafio da delimitação de áreas de preservação permanente. **Revista Árvore**, v.29, n.2, Viçosa-MG, p. 203-212, 2005.

RODRIGUEZ, D.A.; TOMASELLA, J. On the ability of large-scale hydrological models to simulate land use and land cover change impacts in Amazonian basins. **Hydrological Sciences Journal**. 2015.

SÁ JUNIOR, A. Aplicação da classificação de Köppen para o zoneamento climático do estado de Minas Gerais. Dissertação de mestrado. UFLA: Lavras, 2009.

SALEMI, L. F.; GROPPO, J. D.; TREVISAN, R. ; MORAES, J. M. de; LIMA, W. P.; MARTINELLI, L. A. Aspectos hidrológicos da recuperação florestal de áreas de preservação permanente ao longo dos corpos de água. **Revista Instituto Florestal**, v. 23, n. 1 p. 69-80, jun. 2011.

SANTOS, H. G. O novo mapa de solos do Brasil: legenda atualizada / Humberto Gonçalves dos Santos ... [et al.]. — Dados eletrônicos. — Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011. 67 p.

SARAIVA, I.; FERNANDES, W.; NAGHETTINI, M. Simulação hidrológica mensal em bacias sem monitoramento fluviométrico. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.16, p.115-125, 2011.

SARTORI, A.; LOMBARDI NETO, F. L.; GENOVEZ, A. M. Classificação Hidrológica de Solos Brasileiros para a Estimativa da Chuva Excedente com o Método do

Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos Parte 1: Classificação. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 10, n. 4, 2005.

SILVA, B. C.; COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M.; CLARKE, R. T.; CORBO, M. D. Previsão hidroclimática de vazão de curto prazo na bacia do rio São Francisco. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.12, n.3, p. 31-41, 2007.

SILVA, J. A. A. (coord.). O Código Florestal e a Ciência: Contribuições para o Diálogo / **Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência, Academia Brasileira de Ciências;** organização Grupo de Trabalho do Código Florestal. 2. ed. rev. – São Paulo : SBPC, 2012.

SILVA, R. D.; BORMA, L. S.; MATEUS, P. J. B.; AUGUSTO-SILVA, P. B.; RODRIGUEZ, D. A. Estimativa da umidade do solo usando o modelo hidrológico distribuído MHD-INPE: estudo de caso na Bacia do Purus. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR, XVII, João Pessoa, PB. **Anais eletrônicos**... São José dos Campos, SP: INPE, 2015. p. 4292-4299. Disponível em: <www.dsr.**inpe**.br/sbsr2015/files/p0842.pdf >.

SIQUEIRA, V. A.; FLEISCHMANN, A. S.; JARDIM, P. F.; FAN,F. M.; COLLISCHONN, W. IPH-Hydro Tools: a GIS coupled tool for watershed topology acquisition in an open-source environment. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 21, n. 1, 2016.

SOUZA, R. C.; RIZZI, N. E.; RANZINI, M.; ARCOVA, F. C.; CICCO, V.; SILVA, L. R. Interceptação pluviométrica pelo dossel de floresta ombrófila mista alto-montana no Parque Estadual De Campos do Jordão, SP, Brasil. **Floresta**, v. 46, n. 2, p. 243-250. Curitiba, 2016.

TEIXEIRA, G. M. Serviços ambientais hidrológicos das APP em topo de morro. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais e Florestais. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Seropédica: UFRRJ, 2015.

TUCCI, C. E. M.; HESPANHOL, I.; NETTO, O. M. C. Cenários da gestão da água no Brasil: uma contribuição para "visão mundial da água". **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 5, n. 3. p. 31-43, 2000.

TUCCI, C.E.M. Impactos da variabilidade climática sobre os recursos hídricos do Brasil (Relatório de Consultoria). Brasília, **ANA**, 2002. 70p.

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

TUCCI, C.E.M; CLARK, R. T. Impacto das mudanças da cobertura vegetal no escoamento superficial: revisão. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.2, n.1, p. 135-192, 1997.

USGS - United States Geologycal Survey. Shuttle Radar Topography Mission (SRTM). Disponível em: <http://srtm.csi.cgiar.org>. Acesso em maio 2016.

VALERIANO, M. M. Topodata: guia para utilização de dados geomorfológicos locais. São José dos Campos: INPE, 2008. Disponível em: <http://mtc-m16c.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m18@80/2008/07.11.19.24/doc/publicacao.pdf.>

VIOLA, M. R.; MELLO, C. R.; ACERBI JR, F. W.; SILVA, A. M. Modelagem hidrológica na bacia hidrográfica do Rio Aiuruoca, MG. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.13, n.5, p.581–590, 2009.

VIOLA, M. R.; MELLO, C. R.; BESKOW, S.; NORTON, L. Impacts of Land-use Changes on the Hydrology of the Grande River Basin Headwaters, Southeastern Brazil. **Water Resources Management**, v. 28 (13), p. 4537-4550. 2014.

WAINWRIGHT, J.; MULLIGAN, M. Modelling and model building. In: MULLIGAN, M.; WAINWRIGHT, J. (Orgs.). **Environmental modelling: finding simplicity in complexity**, Chichester: John Wiley & Sons, 2004, p. 5-68.

WARREN, M. S. Integração de sensoriamento remoto e modelos hidrológicos para a estimativa da evapotranspiração: uma revisão bibliográfica. **GEOUSP**. São Paulo, n. 35, p. 143-159, 2013.

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

YIRA, Y.; DIEKKRÜGER, B.; STEUP, G. A.; BOSSA, Y. Modeling land use change impacts on water resources in a tropical West African catchment (Dano, Burkina Faso). **Journal of Hydrology**, v. 537, p.187-199, 2016.