



ISSN:1984-2295

Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe>



Aplicação do Modelo Hidrológico MGB-IPH para Simulação de Cenários de Uso do Solo na Bacia do Rio Sapucaí (MG)

Paula Capita Siqueira¹, Nívea Adriana Dias Pons², Benedito Claudio da Silva³, Paulo Siqueira Junior⁴, Letícia de Alcântara Moreira⁵, Alessandro Marques Martins⁶

¹MSc. em Meio Ambiente e Recursos Hídricos, ²Professora Dr. Associada, Universidade Federal de Itajubá, Av. BPS, 1303, CEP 37500-903, Itajubá, Minas Gerais, ³Professor Dr. Adjunto, Universidade Federal de Itajubá, Av. BPS, 1303, CEP 37500-903, Itajubá, Minas Gerais. (35) 3624-1449. silvabenedito@unifei.edu.br. (autor correspondente). ⁴MSc. Tecnologia e Inovações Ambientais, Engenheiro Florestal, Universidade Federal de Lavras, ⁵MSc. em Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Instituto de Recursos Naturais, Universidade Federal de Itajubá. ⁶Engenheiro Hídrico, Instituto de Recursos Naturais, Universidade Federal de Itajubá.

Artigo recebido em 15/01/2022 e aceito em 01/08/2022

RESUMO

O Novo Código Florestal (NCF), Lei Federal 12.651/2012, alterou as definições para Áreas de Proteção Permanente (APP) localizadas nos topos de morro, o que reduziu drasticamente a área legalmente amparada para tal categoria de proteção. Nesse sentido, buscou-se compreender como o uso e a cobertura do solo podem alterar o regime hidrológico, utilizando-se de cenários e simulações de um modelo conceitual distribuído. Para tanto, mapearam-se as APP de topo de morro de acordo com a definição revogada e lei vigente, utilizando-se a metodologia do Modelo Digital de Elevação (MDE) invertido. Tal mapeamento embasou a elaboração de quatro cenários de Uso e Cobertura do Solo (UCS) na bacia, com diferentes percentuais de cobertura florestal. Para a simulação hidrológica utilizou-se o Modelo de Grandes Bacias do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (MGB-IPH), o qual 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 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 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 com o aumento da cobertura florestal na sub-bacia.

Palavras-chave: Simulação hidrológica, legislação ambiental, regime hidrológico

Application of the MGB-IPH Hydrological Model for Simulating Land Use Scenarios in the Sapucaí River Basin (MG)

ABSTRACT

The New Forest Code (NFC), Federal Law 12.651/ 2012, changed the definitions for Permanent Protection Areas (PPA) located on the hilltops. The resolutions drastically reduced the area legally protected by this category of protection. In this sense, we sought to understand how the land use and land cover (LULC) can alter the hydrological regime, using scenarios and simulations of a distributed conceptual model. For that, the top of hill PPAs were mapped according to the revoked definition and current law, using the inverted Digital Elevation Model (DEM) methodology. Such mapping supported the development of four hypothetical LULC scenarios in the basin, with different percentages of forest cover. For the hydrological simulation, the Large Basin Model of the Institute of Hydraulic Research (MGB-IPH) was used and was adjusted to the current conditions of LULC and later, the hydrological behavior was simulated under the different scenarios. According to the mapping carried out, the reduction of PPAs at the top of the hill for the Sapucaí River basin is greater than 99% with the application of the current code. There were no significant differences in the hydrological behavior of the basin considering the current LULC conditions and the three scenarios based on PPA coverage. In the third and fourth scenarios, there was an increase in average flows that coincides with the increase in forest cover. It is noteworthy that this increase is the greater amount of water in the soil, once the runoff was reduced with the increase of the forest cover in the sub-basin.

Keywords: Hydrological simulation, environmental legislation, hydrological regime

Introdução

A disponibilidade e qualidade da água é um fator de extrema importância, haja vista sua estreita relação com a saúde pública (Fortes; Barrocas e Kligerman, 2019). Em termos de disponibilidade, o Brasil ocupa uma posição de privilégio, pois abriga em seu território uma das maiores reservas de água doce do mundo. No entanto, caminhando lado a lado com a disponibilidade, a atividade que mais consome água no país é a irrigação, a qual é responsável por maior parte do uso. Associado à irrigação, o aumento populacional e a grande dependência da energia hidroelétrica são fatores que têm causado stress hídrico no país (ANA, 2020; Tavares e Neto, 2020; Paiva; Montenegro e Cataldi, 2020).

No país existem ainda, em algumas regiões, como no semiárido (Norte e Sudeste), os períodos de estiagem que são comuns e afetam diretamente não só a disponibilidade, mas como a qualidade da água e, vale mencionar, que há maiores desafios para grandes centros urbanos neste período Antropoceno (Braga et al., 2015; Jacobi; Fracalanza e Silva-Sánchez, 2015).

Além dos aspectos já citados, o Brasil, passou recentemente por duas secas severas, uma em 2013 e outra em 2015 resultando em diversas consequências diretas, como escassez hídrica no estado de São Paulo (Neves e Vilanova, 2021).

De acordo com Bezerra, Vieira e Ribeiro (2021) de 2012 a 2017 a Bacia do Rio Paraíba e seu reservatório passaram por uma grande estiagem e, a crise hídrica colocou à tona os conflitos e a má gestão das águas. Ainda conforme os autores, a governança dos recursos hídricos vem sendo desenvolvida de forma falha e com pouca participação.

Para Martirani e Peres (2016), o assunto da necessidade de estratégias de economia de recursos hídricos era até então pouco tratado pela mídia, o que para os autores se caracteriza uma grande negligência e resulta na falta de informação por parte da sociedade civil. Para Marinho, Galvão e Miranda (2020) é urgente a necessidade de ruptura dos padrões de consumo e de produção para que os recursos hídricos sejam melhores administrados.

Assim sendo, fica evidente a necessidade de estudos que visem entender como o uso e a ocupação do solo afetam a disponibilidade hídrica. Dessa forma, os estudos hidrológicos que subsidiem o manejo de bacias hidrográficas e políticas públicas para a garantia da disponibilidade de água se tornam uma ferramenta para posteriores mudanças.

No que se refere ao manejo de bacias hidrográficas, é consenso na literatura que o uso e ocupação do solo interferem diretamente no aumento ou diminuição de processos degradantes ao ambiente. Quando há remoção da vegetação, tem-se prejuízos diretos aos recursos hídricos e à biodiversidade (Pereira et al., 2016; Cruz; LanzaNova e Bisognin 2019), com destaque para aumento da suscetibilidade à erosão e consequente assoreamento de cursos d'água e reservatórios.

Logo, os 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. Dessa forma, tais estudos constituem-se uma importante ferramenta para estratégias de gestão dos recursos hídricos (Venzon; Pinheiro e Kaufmann, 2018).

A integração da modelagem hidrológica aos Sistemas de Informação Geográfica (SIG) permite manipular grande volume de dados, espacializar 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 na literatura, consistindo em uma das ferramentas mais efetivas para conhecimento na área de engenharia de água e solo e recursos hídricos, conforme indica os estudos consultados (Silva et al., 2018; Cruz; LanzaNova e Bisognin, 2019; Andrade e Ribeiro, 2020).

Considerando que o setor agrícola brasileiro é o principal usuário dos recursos hídricos e que há grande desperdício pelo mesmo, observa-se que é na área física ocupada por esse setor onde pode ocorrer a maioria das ações para a melhoria da utilização da água. Além disso, vale lembrar que a expansão agrícola tem como consequência o aumento do escoamento e a diminuição do armazenamento de água no solo, o que interfere diretamente na disponibilidade hídrica (Magalhães; Montenegro; Andrade; Montenegro e Fontes-Júnior, 2018). A representação de fenômenos que representam os sistemas naturais propicia o desenvolvimento e a aplicação de modelos que têm por objetivo retratar o comportamento de tais sistemas. Assim sendo, os modelos hidrológicos auxiliam de diversas formas no entendimento de processos físicos em dimensões temporais e fornecem previsões capazes de serem revertidas (dependendo da sua magnitude e gravidade) (Oliveira, 2016).

Cabe mencionar a importância da integração entre as políticas hídricas, ambientais e agrícolas e as pesquisas para o desenvolvimento viável de um país com abundantes recursos naturais, cuja economia é baseada na produção agropecuária e onde a hidroeletricidade representa mais de 70% de sua matriz energética (ANA, 2019; Mesquita, 2017).

A remoção da cobertura vegetal, seja florestal ou campestre, para dar lugar às áreas agrícolas ou urbanas, altera toda a dinâmica hidrológica de uma bacia hidrográfica, desencadeando inúmeros processos, como erosão e assoreamento de cursos d'água, podendo influenciar, inclusive, reservatórios e outras bacias a jusante. A expansão agrícola e urbana ocorre, em geral, sem planejamento, ocupando, não raro, as Áreas de Preservação Permanente (APP). Essas áreas, embora legalmente criadas e protegidas, são bastante vulneráveis e em grande parte do território nacional são alteradas ou degradadas, não atendendo ao seu objetivo de criação, principalmente no que se refere à conservação dos recursos hídricos, do solo e da biodiversidade.

Em 2012 foi instituído o Novo Código Florestal pela Lei nº 12.651 que, entre outras modificações, definiu novos critérios para as APP 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 (Brasil, 2012).

Nesse sentido, cenários de uso do solo realizados a partir das exigências do NFC constituem uma ferramenta que vai além da gestão dos recursos hídricos, podendo também fomentar a discussão sobre a referida legislação.

Ante ao contexto apresentado, o presente trabalho tem por objetivo compreender como o uso e a cobertura do solo podem alterar o regime hidrológico, utilizando-se de cenários hipotéticos e simulações de um modelo conceitual distribuído. A hipótese principal deste trabalho é que os impactos de mudanças nos usos e na ocupação do solo podem ser estimados e analisados por meio de simulação com modelos hidrológicos conceituais com equações de base física.

Cabe mencionar que a área estudada teve grande parte de sua cobertura vegetal substituída por atividades agropecuárias, além de que, nas últimas décadas houve a expansão urbana significativa de centros urbanos populosos que compõem a área total. Aliado a tais fatores, há históricos de eventos hidrológicos severos, principalmente nas cidades localizadas às margens de corpos d'água e/ou seus tributários.

Conhecer o comportamento hidrológico desta bacia e prever modificações a partir de cenários de uso do solo pode 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.

Metodologia

Área de estudo

A área estudada possui rede de drenagem de 9.271 km² e compreende a bacia hidrográfica do Rio Sapucaí. Essa bacia corresponde à Unidade de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos (UPGRH) GD 5, abrangendo 51 municípios, sendo 3 no estado de São Paulo e 48 em Minas Gerais (IGAM, 2015). Cabe ressaltar que a área oficial de drenagem da bacia é de 8.882 Km², o que não corresponde à área considerada neste estudo que foi de 9.271 km², devido ao método computacional de determinação da bacia e possivelmente diferenças entre as bases de dados adotadas.

A bacia insere-se no Domínio Fitogeográfico da Mata Atlântica, apresentando remanescentes das fisionomias florestais denominadas Floresta Ombrófila, na região de cabeceira; Florestas Estacionais Semidecíduas, nas encostas íngremes e montanhas mais distantes da serra e, por fim, Matas Ciliares, que acompanham os cursos d'água (COPASA, 2010; Minas Gerais, 2019).

O clima, segundo a classificação de Köppen e aplicado ao estado de Minas Gerais é CWB no alto Sapucaí (onde estão as maiores altitudes) e CWA na região do médio e baixo Sapucaí. Já no que diz respeito ao uso da água, o abastecimento público, irrigação, mineração e uso industrial são os principais usos consuntivos (COPASA, 2010).

Contudo, vale mencionar, que a utilização de cenários hipotéticos tende a criar uma visão efetiva das oportunidades e barreiras da região em que o estudo foi aplicado (Andrade e Ribeiro, 2020).

Modelo utilizado e entrada de dados

Para as simulações propostas, foi utilizado o 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 (Felix e Paz, 2016).

Em relação à estrutura do modelo, a bacia é dividida em pequenas bacias interconectadas por canais, com informações sobre o tipo de vegetação e solo dentro de cada bacia, categorizadas em uma ou mais unidades de resposta hidrológica (URH). O balanço hídrico do solo é calculado por geração do escoamento superficial gerado pelo excesso de capacidade de armazenamento de água no solo. A interceptação de copa é representada por um reservatório conceitual relacionado à cobertura vegetal, expresso em termos de índice de área foliar. Os efeitos da atenuação e atraso do escoamento nas bacias são representados por reservatórios lineares, enquanto o direcionamento do fluxo nos corpos hídricos é calculado pelo método linear de Muskingum-Cunge (Siqueira; Collischonn; Fan; Chou, 2016).

No que tange aos dados de entrada, utilizou-se um modelo digital de elevação (MDE) com resolução espacial de 90 m, obtido da missão SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) (USGS, 2015) para a fase inicial da pesquisa, envolvendo a discretização da bacia hidrográfica, que consiste na determinação da direção de fluxo da água nas minibacias, rede de drenagem, comprimento e declividade de trechos de rios,

delimitação da bacia, sub-bacias. As altitudes encontradas variam de 794 a 2397 m, na discretização da bacia, foram considerados 11 postos fluviométricos. Para a elaboração do Mapa da Unidade de resposta Hidrológica (URH), utilizou-se de dados disponibilizados pela Universidade Federal de Lavras/ Departamento de Ciências Florestais/ Laboratório de Estudos e Projetos em Manejo Florestal (UFLA/DCF/LEMAF).

Para o mapeamento temporal do uso do solo, 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).

As classes originais da base de dados foram reagrupadas da forma mais conveniente para este estudo, que apresenta quatro classes: floresta, agropecuária, área urbana e água. O Mapa de Uso do Solo (Figura 1) evidencia o predomínio da classe “agropecuária” com 74% da área de estudo e 23% de vegetação nativa.

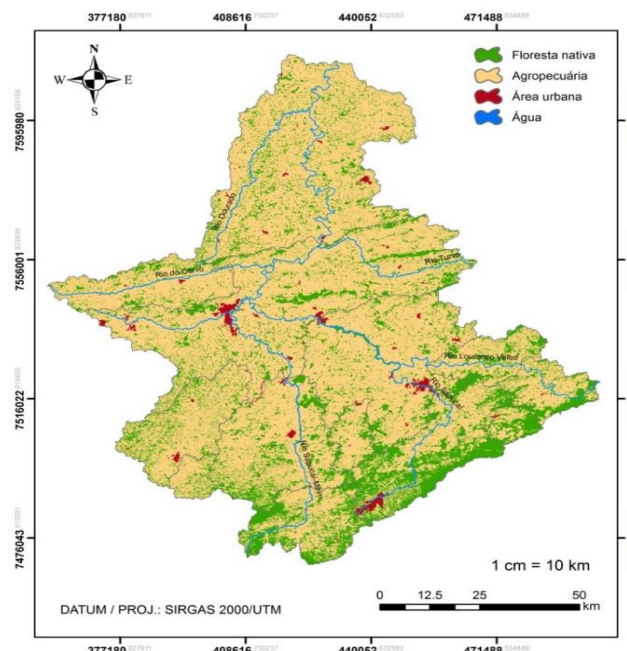


Figura 1– Mapa de uso e cobertura do solo da bacia do rio Sapucaí. Fonte da base de dados: IGAM (2015); UFLA/DCF/LEMAF (dados não publicados).

O Mapa de Solos da bacia foi elaborado a partir do cruzamento de informações do

Levantamento de Solos do Estado de Minas Gerais (FEAM, 2019), Novo Mapa de Solos do Brasil

(Santos et al., 2011) e modelagem gerada pelo algoritmo *Height Abolve Near Drainage* (HAND) (INPE, 2019).

A primeira classe definida neste estudo é utilizada para compor o mapa de solos, e 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 (Figura 2), em quatro classes (A, B, C e D), sendo que a classe A agrupa os solos mais profundos e bem drenados, enquanto que a classe D agrupa os solos menos drenados e que geram mais escoamento, conforme proposto por Sartori, Lombardi-Neto e Genovez (2005).

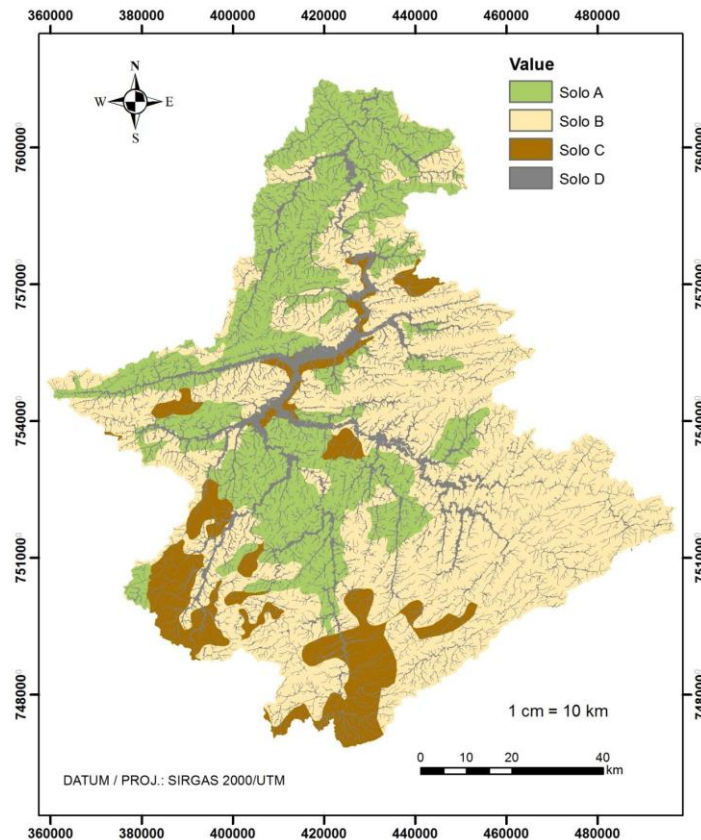


Figura 2 – Classificação do comportamento hidrológico dos solos que ocorrem na bacia do rio Sapucaí.

Já no que tange aos dados hidrológicos, 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 de Águas – ANA.

Os dados de vazão foram obtidos de 11 postos fluviométricos já existentes na bacia estudada. Os dados climáticos foram disponibilizados pelo 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.

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 e Norman (2015). Os valores dos

parâmetros foram baseados na literatura (Felix e Paz, 2016; Franco, 2017). Os parâmetros fixos que devem ser definidos são albedo (α), altura da vegetação (h), índice de área foliar (IAF), e resistência superficial (r_s). Todos estes parâmetros são utilizados no cálculo da evapotranspiração pelo método de Penman-Monteith (Paiva et al., 2013). Os valores adotados para os parâmetros fixos são apresentados na Tabela 1. Foram definidas 10 Unidades de Resposta Hidrológica (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 3 apresenta o Mapa de URH da bacia no cenário atual de uso do solo, que foi utilizado na calibração do modelo.

Tabela 1 – Valores dos parâmetros fixos adotados para cada classe de uso.

PARÂMETROS				
USO DO SOLO	Albedo (α)	IAF	Altura (h)	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

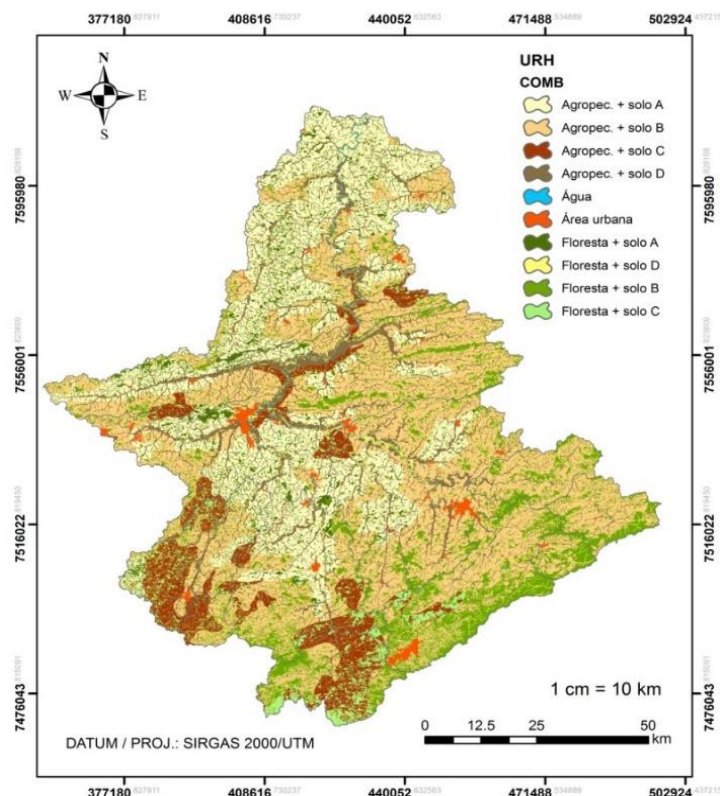


Figura 3 – Mapa de Unidades de Resposta Hidrológica (URH) do cenário real da bacia do rio Sapucaí

Para o mapeamento das APP 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 delimitação das APP 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 50m. conforme a definição legal desta categoria de APP, em ambas as referências legais.

A mesma técnica foi utilizada para delimitar as APP no entorno da rede de drenagem. Considerando que a bacia possui cursos d'água com larguras inferiores e superiores a 10 m, obtiveram-se 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, 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 APP 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.

O mapeamento das APP 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 o 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".

Neste estudo, a cobertura vegetal nas APP 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.

Cenários de uso e cobertura do solo

Como observado anteriormente, a Bacia do Rio Sapucaí é ocupada prioritariamente pelo uso agropecuário, devido aos ciclos econômicos históricos e atuais baseados na pecuária bovina (corte e leite) prioritariamente extensiva, cafeicultura e outras culturas agrícolas.

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 APP 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 as seguintes ferramentas: a conversão dos arquivos de *raster* para polígonos, alteração no valor que identifica as classes e montagem de mosaicos. Desta forma, os cenários criados foram: 1. Cenário de maior degradação da cobertura florestal na bacia e nas APPs de topo de morro; 2. Cenário otimista do ponto de vista de conservação da cobertura florestal nas APP de topo de morro; e 3. Cenário que representa o cumprimento legal da Resolução CONAMA 303/2002 (Tabela 2).

Tabela 2- Cenários criados para o estudo

Cenário 1- C1	Cobertura florestal nas APP de topo de morro de acordo com o estabelecido na legislação vigente (Brasil, 2012), somada às tendências de substituição de uso da terra nos próximos 100 anos- 20% fragmentos florestais remanescentes serão convertidos em áreas de agropecuária (Mello et al., 2015) ¹ .
Cenário 2- C2	Apresenta a cobertura florestal das APP de topo de morro de acordo com o antigo código florestal e Resolução CONAMA 303 (Brasil, 1965; CONAMA, 2002) ² .
Cenário 3- C3	Assim como o C2 considera as APP de acordo Resolução CONAMA 303/2002 e recupera a cobertura florestal das APP em todas as categorias.

¹ Tendência de conversão foi aplicada aos fragmentos florestais pequenos, com área menor que 10 hectares.

² Conserva a cobertura florestal atual, onde é mantido os fragmentos florestais e é recuperada a vegetação das APP de topo de morro que não possuem cobertura vegetal.

Estes três cenários hipotéticos foram propostos e aplicados à bacia inteira. Para uma análise mais detalhada, um quarto cenário (C₄) foi desenhado apenas para a sub-bacia Vargem do Cervo (Estação 61390000). O C₄ consiste em considerar a cobertura florestal na área total da sub-bacia, exceto nas áreas identificadas pelas classes água e urbana

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, com a substituição do arquivo “bloco.txt” que representa o mapa de URH gerado para cada cenário.

As simulações se referem 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 ou aspectos inerentes ao manejo e a conservação do solo, uma vez que estes podem alterar a permeabilidade do perfil e influenciar o balanço hídrico no mesmo (Tiecher, 2016).

Resultados

Mapeamento das Áreas de Preservação Permanente 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 ha, o que representa 5,59% da área de estudo. A área ocupada por cada categoria de APP está resumida na Tabela 3.

As APP de curso d'água e cabeceiras (nascentes) realizado sobre a rede de drenagem obtida do IBGE (1:250.000), resultou em 41.084 ha de áreas protegidas nas margens 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 3– 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 45°	449	0,04
Topos de morro	20	0,002
Altitude superior 1800 m	10.171	1,09

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 17°, 728 morros atendem o critério e seus respectivos terços superiores totalizam 7149,19 ha (0,77 % da área total da bacia).

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 25°, restaram quatro morros, cujo terço superior representa o total de APP com 20 ha (0,002% da área total da bacia), apresentado na Figura 4. A redução dessa categoria de área protegida para a bacia do rio Sapucaí é superior a 99% com a aplicação do código vigente.

A Figura 5 apresenta o mapeamento de APP de topo de morro de acordo com o Código Florestal vigente (Lei 12.651/2012), com detalhe em dois dos quatro morros legalmente protegidos (devido à área reduzida dos polígonos, os mesmos

não seriam bem representados na figura da bacia inteira).

De acordo com o Código Florestal vigente, verificou-se o uso irregular do solo em 328 km², significando que 56% da área das APP estão atualmente sob o uso agropecuário. Nem toda esta área, no entanto, deve ser considerada como

passivo ambiental, visto que a lei vigente anistia os desmatamentos anteriores a 2008. As áreas urbanas 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.

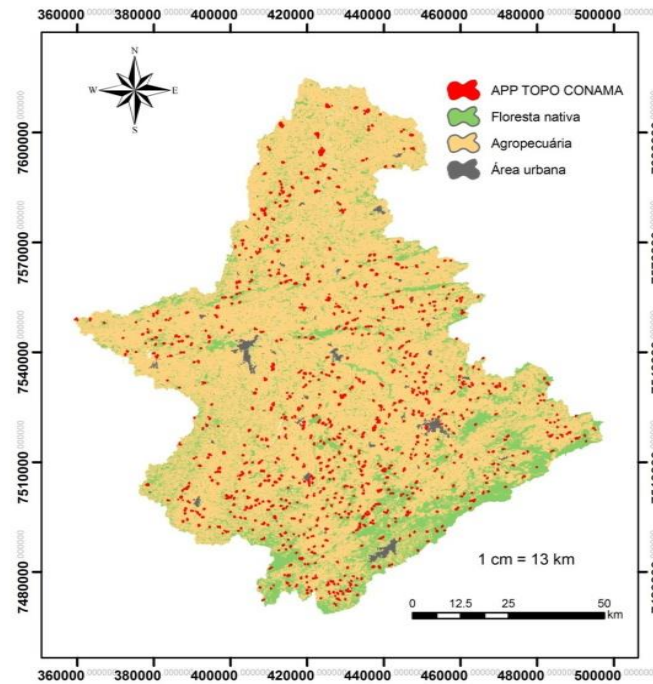


Figura 4 - Mapeamento de APP de topo de morro, de acordo com resolução revogada (CONAMA 303/2002) para a bacia

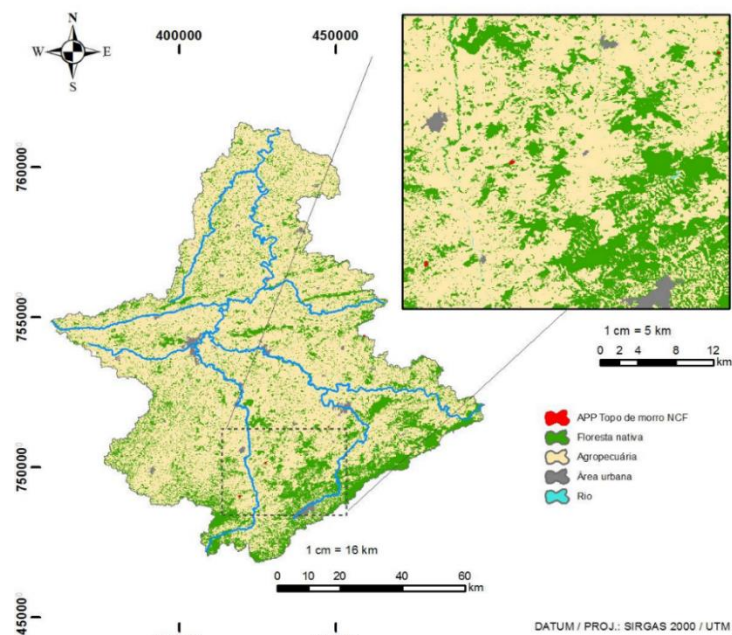


Figura 5- Mapeamento de APP de topo de morro de acordo com o Código Florestal vigente (Lei 12.651/2012) e detalhe de três dos quatro morros. Mapeamento de APP de topo de morro (detalhe de dois dos quatro morros) de acordo com o Código Florestal vigente (Lei 12.651/2012)

Cenário de uso do Solo

O cenário C1 apresenta a conversão de 472 km² de remanescentes florestais em agropecuária, o que representa uma modificação de 5,09 % no contexto de área total da bacia, em relação ao uso atual. O cenário C2 apresenta um pequeno incremento de floresta em relação ao uso atual, 45,56 km² e foi desenhado com o objetivo de verificar eventual influência 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%. Já 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. E o cenário C4, aplicado somente a bacia do ribeirão Vargem do Cervo, tem-se um incremento de floresta de 55,9 km² para 480 km². A área de drenagem desta sub-bacia é de 484 km².

Simulação Hidrológica para o uso atual e para os cenários propostos

A calibração do modelo foi satisfatória, apresentando valores considerados aceitáveis

para as sub-bacias. Os valores dos coeficientes de ajuste de Nash, Nash Log e erro de volume constam na Tabela 4. A Tabela 5 apresenta a vazões de permanência simuladas para a condição atual e cenários da bacia do rio Sapucaí, na qual é possível notar que as alterações nas vazões são mínimas em todos os cenários em relação à condição atual.

Na análise dos diferentes componentes do balanço hídrico para a sub-bacia “Vargem do Cervo” (Tabela 6) verifica-se a relação direta entre o aumento da capacidade de armazenamento de água no solo (W_{BM}), interceptação (α), escoamento subterrâneo (Q_{sub}) e aumento da cobertura florestal. O C4 apresentou lâmina d’água superior em 101 mm no W_{BM} comparado ao uso atual. Tanto na Tabela 5, que apresenta a vazão média anual, quanto na Tabela 6, com valores médios diários, verifica-se a redução do escoamento superficial (Q_{sup}) com o aumento da cobertura florestal no C4

Tabela 4 – Resultados da calibração

Sub-Bacia	POSTO	Nash	Nash Log	Erro Vol (%)
1	Itajubá	0,58	0,67	-1,65
2	Virginia	0,29	0,36	-17,20
3	Itajubá	0,56	0,64	-13,33
4	Brazópolis	0,62	0,52	12,06
5	Santa Rita do Sapucaí	0,39	0,70	-0,69
6	Conceição dos Ouros	0,53	0,62	-9,79
7	Cambuí	0,33	0,64	26,79
8	Pouso Alegre	0,23	0,72	-2,71
9	Vargem do Cervo	0,56	0,70	-4,82
10	Careaçu	0,40	0,43	-19,96
11	Paraguaçu	0,30	0,74	3,24

Tabela 5– Vazões (m³/s) de permanência simuladas para condição atual e os cenários da bacia do rio Sapucaí.

	Q _{10%}	Q _{20%}	Q _{50%}	Q _{80%}	Q _{90%}
ATUAL	356,67	269,56	153,79	95,92	80,56
C1	356,58	269,16	152,54	94,84	79,52
C2	356,58	269,46	154,11	96,29	80,90
C3	358,19	270,98	155,91	97,06	81,81

Tabela 6 – Valores médios de longo período (mm.dia⁻¹) nos diferentes componentes do balanço hídrico da sub-bacia Vargem do Cervo.

	ATUAL	C1	C2	C3	C4
W_{BM}	115,78	108,17	114,47	127,13	216,78
P	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00
A	0,27	0,25	0,27	0,31	0,55
ET	2,25	2,22	2,21	2,19	2,13
Q_{sup}	0,54	0,54	0,53	0,548	0,47
Q_{sub-sup}	0,010	0,10	0,10	0,10	0,10
Q_{sub}	1,12	1,108	1,11	1,12	1,31

W_{BM}: água no solo; **P**: precipitação; **A**: interceptação; **ET**: evapotranspiração; **Q_{sup}**: escoamento superficial; **Q_{sub-sup}**: escoamento sub-superficial; **Q_{sub}**: escoamento subterrâneo.

Discussão

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), Koumrouyan (2015) e Cunha et al. (2015). Soares-Filho et al. (2014) identificaram que a redução desta categoria de áreas protegidas chega a 87%, considerando todo o território nacional.

Koumrouyan (2015) conduziu estudo semelhante na bacia do rio Verde, vizinha a bacia do rio Sapucaí e, embora a metodologia empregada tenha sido distinta desta, esta autora reporta também a redução de 99% nas APP de topo de morro mapeadas de acordo com as referidas leis.

Cunha et al. (2015) estudou uma bacia na região sul do Brasil e encontrou drástica redução desta categoria de APP, da ordem de 89%.

As falhas técnicas relativas ao mapeamento automático dessas áreas que persistem no NFC são apontadas por alguns autores (Kourouyan, 2015; Oliveira, 2015). A diferença percentual nas áreas protegidas definidas pela resolução revogada e pela lei vigente, ainda que expressiva, representa um percentual bem pequeno da bacia, 0,77% são APP de topo de morro no C2. Esses topos de morro preservados, no contexto das microbacias em que se localizam, favoreceriam a

infiltração da água no solo e reduziriam as perdas de solo por erosão (Calder, 1998).

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 em longo prazo (Tambosi et al. 2015).

Embora esses remanescentes florestais sejam protegidos pela Lei da Mata Atlântica 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). Moreira et al. (2017) identificou o uso irregular de áreas de APP na região central do estado de Minas Gerais e indicou comprometimento da quantidade de água na região, assim, mesmo não se tratando da mesma bacia hidrográfica deste estudo, é possível observar que o uso irregular de tais áreas não é algo incomum.

Dados do Cadastro Ambiental Rural (CAR) apontam que pelo menos 22,2 Mha (milhões de hectares) de APP não tem cobertura vegetal nativa, são áreas que foram desmatadas e que deveriam estar protegidas (Girardi, 2016) e, de acordo com o NFC 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, diminuição das reservas aquíferas, e aumento da vazão nos rios. Dessa forma, tais influências podem comprometer a demanda de água futura, tanto no que diz respeito à quantidade, quanto à qualidade do recurso em questão (Tambosi et al., 2015).

Simulação hidrológica para o uso do solo atual e os cenários propostos

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 5%, 0,5% e 9,6%, respectivamente, são pouco representativas no contexto de área total da bacia. De acordo com Bosch e Hewlett (1982), modificações no uso do solo inferiores a 20% da área da bacia são difíceis de serem percebidas em simulações hidrológicas, devido às incertezas inerentes aos métodos hidrométricos.

Koumrouyan (2015) conduziu estudo semelhante na bacia do rio Verde, embora a metodologia empregada tenha sido um pouco distinta da vizinha a bacia do rio Sapucaí verificou-se que em diferentes cenários de cobertura florestal a vazão média foi estatisticamente reduzida apenas entre os cenários em que o incremento de floresta foi 16% em relação à área total da bacia ou com a bacia totalmente coberta por floresta nativa.

Já Bezerra (2016) utilizou o MGB-IPH para estudar a bacia do Rio Grande, afluente do Rio São Francisco, tal região é de extrema importância, pois é a responsável pelo abastecimento da região do Oeste Baiano, como resultado, o autor constatou mudanças das vazões como resultado das mudanças no uso do solo. A conclusão obtida foi que a remoção da cobertura vegetal provoca reduções significativas das vazões na área estudada. Bayer e Collischonn (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 ($244 - 344 \text{ mm.ano}^{-1}$), 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, o que está de acordo com os resultados de Caram (2011), mas contrário a maior parte dos estudos que indicam redução da vazão com a substituição de áreas agrícolas por florestas nativas (Kourouyan, 2015; Yira et al. 2016; Garcia, 2018).

A análise da origem do escoamento, entretanto, mostrou expressivo aumento da quantidade de água no solo (W_{BM}) e do escoamento subterrâneo (Q_{sub}) nos cenários C3 e C4, que tem maior cobertura florestal. A maior capacidade de solos sob floresta de armazenar água da chuva justifica-se pelas condições favoráveis de infiltração proporcionadas pelas raízes, aumento dos macroporos e matéria orgânica, que favorecem a percolação e o armazenamento de água no solo (Tiecher e Minella, 2015; Tiecher, 2016).

Importante ressaltar que tal sub-bacia apresenta, em sua maior parte, solos agrupados nas classes A e B, que denotam solos profundos e bem drenados. No C3 e C4 verificou-se, ainda, a redução do escoamento superficial (Q_{sup}), o que está de acordo com a literatura.

Alguns estudos destacam ainda a capacidade de armazenamento de água em solos florestais e os benefícios das florestas nas regiões de cabeceira das bacias, principalmente no que diz respeito à disponibilidade de água (Wrege et al., 2018; Groppo et al., 2019).

Com relação à interceptação, os valores encontrados neste estudo concordam com os de Bayer e Collischonn (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 e Collischonn (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.

Conclusão

O mapeamento adequado das APP de topo de morro exige bom conhecimento do analista em SIG, ainda que utilize uma rotina automatizada. Atentar-se à 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 NCF 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 resistência superficial (r_s), entretanto, apresentaram resultados de acordo com a literatura, em que cenários com maior cobertura florestal apresentam redução nas vazões. Isto 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.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Referências

- ANA. Agência Nacional das Águas, 2020. Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil: informe anual. Brasília.
- Andrade, M.P.; Ribeiro, C.B.M., 2020. Impacts of land use and cover change on Paraíba do Sul watershed streamflow using the SWAT model. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 25, 1-13.
- Bayer, D.M.; Collischonn, W., 2013. Análise de Sensibilidade do Modelo MGB-IPH a Mudanças de uso da Terra. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 18, 165-179.
- Bayer, D.M., 2014. 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. Porto Alegre.
- Bezerra, P.S., 2016. Avaliação dos efeitos das alterações na cobertura e uso do solo sobre o regime de vazões via modelagem hidrológica considerando incerteza paramétrica. Dissertação (Mestrado) Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, UNB, Brasília.
- Bezerra, A.P.; Vieira, Z.M.C.L.; Ribeiro, M.M.R., 2021. Water governance assessment at different scales: a reservoir case study in the Brazilian semiarid region. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 26, 1-13.
- Bosch, J.M.; Hewlett, J.D., 1982. A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration. *Journal of Hydrology*, 55, 3-23.
- Braga, G.G.; Becker, V.; Oliveira, J.N.P.; Mendonça Jr, J.R.; Bezerra, A.F.M.; Torres, L.M.; Galvão, A.M.F.; Mattos, A., 2015. Influence of extended drought on water quality in tropical reservoirs in a semiarid region. *Acta Limnologica Brasiliensia*, 27, 15-23.
- BRASIL. Lei nº 4.771, de 15 de setembro de 1965. Revogada pela Lei nº 12.651, de 2012. Texto para impressão. Institui o Código Florestal Brasileiro. Brasília, DF, 1965. Disponível em :< www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L4771.htm >. Acesso em 29 jan. 2020.
- BRASIL. Lei Nº 12.651: Código Florestal. Brasília, DF, 25 maio 2012. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/l12651.htm>. Acesso em 29 jan. 2020.
- Calder, I.R., 1998. "Water-resource and land-use issues". SWIM Paper 3. International Water Management Institute, Colombo, Sri Lanka.
- Caram, R.O., 2011. Mudanças no uso do solo e resposta hidrológica na bacia do rio Piracicaba. Tese de doutorado em Ciências / Irrigação e Drenagem. ESALQ/USP. Piracicaba.
- CONAMA. Conselho Nacional de Meio Ambiente, 2002. Resolução 303 de 20 de março de 2002. Dispõe sobre parâmetros, definições e limites de Áreas de Preservação Permanente. Brasília.
- COPASA. Companhia de Saneamento de Minas Gerais, 2010. Plano Diretor de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Sapucaí.

- Belo Horizonte.
- Cruz, R.; Lanzanova, M.E.; Bisognin, R.P., 2019. Mapeamento do Uso da Terra e Identificação de Conflitos Legais em Áreas de Preservação Permanente Utilizando SIG. *Ciência e Natura*, Santa Maria, 41, 01-12.
- Cunha, H.N.; Nóbrega, M.R. R.; Fiori, D.; Filippini Alba, J.M.; Miura, A.K.; Saldanha, D.L., 2015. 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.
- FEAM. Fundação Estadual de Meio Ambiente de Minas Gerais, 2020. Banco de Solos de Minas Gerais. Viçosa. Disponível: <http://www.feam.br/banco-de-noticias/949-mapas-de-solo-do-estado-de-minas-gerais>. Acesso: 19 mar. 2020.
- Felix, V.S., Paz, A.R., 2016. Representação dos processos hidrológicos em bacia hidrográfica do semiárido paraibano com modelagem hidrológica distribuída. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos* [online] 21. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1590/2318-0331.011616009>. Acesso: 20 mar. 2020.
- Fortes, A.C.C., Barrocas, P.R.G., Kligerman, D.C., 2019. A vigilância da qualidade da água e o papel da informação na garantia do acesso. *Saúde em Debate* [online] 43. Disponível: <https://doi.org/10.1590/0103-11042019S302>. Acesso: 24 mar. 2020.
- Franco, A.C.L., 2017. Calibração do modelo SWAT com evapotranspiração proveniente de sensoriamento remoto e vazão observada. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- Garcia, L.G., 2018. Composição e configuração da cobertura florestal na Bacia Hidrográfica e seus efeitos nos serviços hidrológicos. Tese (Doutorado) - Curso de Doutorado em Recursos Florestais, Esalq- Usp, Piracicaba.
- Giraldi, G., 2016. Terras privadas têm 30% menos floresta do que deveriam. *Coluna Sustentabilidade*. *Jornal Estadão* [online]. Disponível: <https://sustentabilidade.estadao.com.br/blogs/ambiente-se/analise-preliminar-aponta-deficit-de-30-de-reserva-legal-no-pais/>. Acesso: 10 out. 2021.
- Groppi, J.D., Salemi, L.F., Moraes, J.M., Trevisan, R., Seghesi, L. A. M., 2019. Capacidade de retenção de água do dossel vegetativo: comparação entre Mata Atlântica e plantação florestal de eucalipto. *Ciência Florestal* [online] 29. Disponível: <http://dx.doi.org/10.5902/1980509816862>. Acesso: 20 jun. 2022.
- Hott, M.C., Guimarães, M., Miranda, E.E., 2005. 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. *Anais eletrônicos...* São José dos Campos. Disponível em: <http://mar.te.sid.inpe.br/col/ltid.inpe.br/sbsr>. Acesso: 22 jan. 2020.
- IGAM. Instituto Mineiro de Gestão das Águas, 2015. Portal Infohidro: mapoteca. Belo Horizonte. Disponível: <http://portalinfohidro.igam.mg.gov.br/mapas-e-bases-cartograficas>. Acesso: 9 dez. 2015.
- INPE. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2019. Distância vertical à drenagem mais próxima- HAND. São José dos Campos. Disponível: <http://www.dpi.inpe.br/Ambdata/hand.php>. Acesso: 19 mar. 2020.
- Jacobi, P.R., Fracalanza, A.P., Silva-Sánchez, S., 2015. Governança da água e inovação na política de recuperação de recursos hídricos na cidade de São Paulo. *Cadernos Metrópole* [online] 17. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1590/2236-9996.2015-3303>. Acesso 20 jun. 2022.
- Koumrouyan, A., 2015. Desenvolvimento de cenários de cobertura da terra em uma bacia de meso escala na mata atlântica e análise de respostas hidrológicas simuladas pelo modelo DHSVM. Tese de doutorado em Ciência do Sistema Terrestre. São José dos Campos: INPE.
- Magalhães, A.G., Montenegro, A.A.A., Andrade, C.W.L., Montenegro, S.M.G.L., Fontes Júnior, R.V.P., 2018. Hydrological modeling of an experimental basin in the semiarid region of the Brazilian State of Pernambuco. *Revista Ambiente e Água* [online] 13. Disponível: <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2204>. Acesso: 20 jun. 2022.
- Marinho, S.D.A.M., Galvão, C.O., Miranda, L.I.B., 2020. A cidade sensível à água sob a perspectiva do metabolismo urbano e da análise da produção do espaço. *Engenharia Sanitária e Ambiental* (online), 25. Disponível: <https://doi.org/10.1590/S1413-41522020191392>. Acesso: 20 jun. 2022.
- Martirani, L.A., Peres, I.K., 2016. Water crisis in São Paulo: news coverage, public perception and the right to information. *Ambiente & Sociedade*

- [online] 19. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4422asoc150111r1v1912016>. Acesso: 20 jun. 2022.
- Mello, C.R., Ávila, L.F., Viola, M.R., Curi, N., Norton, L.D., 2015. Assessing the climate change impacts on the rainfall erosivity throughout the twenty-first century in the Grande River Basin (GRB) headwaters, Southeastern Brazil. *Environmental Earth Sciences* 73, 8683 – 8698.
- Mesquita, L.F.G., 2017. Gestão de Recursos Hídricos na Bacia Hidrográfica do Rio Preto: Atores, Ações e Conflitos. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Desenvolvimento Sustentável, Universidade Federal de Brasília, Brasília.
- MINAS GERAIS, Estado de Minas Gerais. 2019. Clima, vegetação e relevo. Disponível: <https://www.mg.gov.br/conteudo/conheca-minas/geografia/clima-vegetacao-e-relevo>. Acesso: 19 mar. 2020.
- Moreira, J.G.C., Santos, C. D. S., Saraiva, E.A.F., Pinto, J.R., 2017. Uso e Ocupação do Solo em Áreas de Preservação Permanente. *Mundo Geo* [online], 1. Disponível: <https://mundogeo.com/2017/11/10/uso-e-ocupacao-do-solo-irregular-em-areas-de-preservacao-permanente-estudo-de-caso-corrego-bela-vista-mg/>. Acesso: 20 jun. 2022.
- Neves, A.O., Vilanova, M.R.N., 2021. Caracterização da seca histórica da década de 2010 na Bacia do Rio Paraíba do Sul, Estado de São Paulo, Brasil. *Engenharia Sanitária e Ambiental* (online) 26. Disponível: <https://doi.org/10.1590/S1413-415220190023>. Acesso: 20 jun. 2022.
- 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 Hydrology* 522, 439-451.
- Oliveira, G.C., 2015. 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.
- Oliveira, G.C., Fernandes-Filho, E.I., 2016. Automated mapping of permanente preservation areas on hilltops. *Revista Cerne* 22, 111-120.
- Oliveira, G.P.C., 2016. Modelagem hidrológica apoiada por sistema de informações geográficas. Dissertação (Mestrado) - Curso de Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- Paiva, R.C.D., Buarque, D.C., Collischonn, W., Bonnet, M.P., Frappart, F., Calmant, S., Mendes, C.A.B., 2013. Large-scale hydrologic and hydrodynamic modeling of the Amazon River Basin. *Water Resources Research* [online] 49. Disponível: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/wrcr.20067/epdf>. Acesso: 28 mar 2020.
- Paiva, L.F.G., Montenegro, S.M., Cataldi, M., 2020. Prediction of monthly flows for Três Marias reservoir (São Francisco river basin) using the CFS climate forecast model. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos* [online] 25. Disponível: <https://doi.org/10.1590/2318-0331.252020190067>. Acesso: 20 jun. 2022.
- Pereira, B.W.F., Maciel, M.N.M., Oliveira, F. A., Alves, M. A. M. S., Ribeiro, A.M., Ferreira, B.M., Ribeiro, E.G.P., 2016. Land use and water quality degradation in the Peixe-Boi River watershed. *Journal Of Applied Science* [online], 11. Disponível: <http://dx.doi.org/10.4136/ambi-agua.1802>. Acesso: 20 jun. 2022.
- Santos H.G., Carvalho-Junior, W., Dart, R. O., Aglio, M.L., Sousa, J.S., Pares, J.G., Fontana, A., Martins, A.L.S., Oliveira, A.P., 2011. Novo Mapa de Solos do Brasil: legenda atualizada. Rio de Janeiro: Embrapa Solos. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/handle/doc/920267>. Acesso: 19 mar. 2020.
- Sartori, A., Lombardi Neto, F.L., Genovez, A.M., 2005. Classificação Hidrológica de Solos Brasileiros para a Estimativa da Chuva Excedente com o Método do 85 Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos Parte. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos* [online] 10. Disponível: <http://dx.doi.org/10.21168/rbrh.v10n4.p5-18>. Acesso: 20 jun. 2022.
- Siqueira, V.A., Collischonn, W., Fan, F. M., Chou, S.C., 2016. Ensemble flood forecasting based on operational forecasts of the regional Eta EPS in the Taquari-Antas basin. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos* [online] 21. Disponível: <https://doi.org/10.1590/2318-0331.011616004>. Acesso: 20 jun. 2022.
- Silva, V.P.R., Silva, M.T., Singh, V. P., Souza, E. P., Braga, C.C., Holanda, R. M., Almeida, R.S., Sousa, F.A.S., Braga, A.C.R., 2018. Simulation of stream flow and hydrological response to land-cover changes in a tropical river basin. *Journal Catena* [online] 162. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2017.11.024>. Acesso: 20 jun. 2022.

- Soares-Filho, B., Rajão, R., Macedo, M., Carneiro, A., Costa, W., Coe, M., Rodrigues, H., Alencar, A. Cracking Brazil's Forest Code. Science-Policy-Forum [online] 344. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1126/science.1246663>. Acesso: 20 jun. 2022.
- Tambosi, L.R., Vidal, M. M., Ferraz, S. F. B., Metzger, J.P., 2015. Funções eco-hidrológicas das florestas nativas e o Código Florestal. Estudos Avançados [online] 29. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1590/s0103-40142015000200010>. Acesso: 20 jun. 2022.
- Tavares, J.M.S., Pereira-Neto, C., 2020. Aspectos do crescimento populacional: estimativas e uso de indicadores sociodemográficos. Formação [online] 27. Disponível: <https://doi.org/10.33081/formacao.v27i50.5928>. Acesso: 20 jun. 2022.
- Tiecher, T.; Minella, J.P.G., 2015. Manejo e conservação do solo e da água em pequenas propriedades rurais no sul do Brasil: contextualizando as atividades agropecuárias e os problemas erosivos. Brasil.
- Tiecher, T., 2016. Manejo e conservação do solo e da água em pequenas propriedades rurais no sul do Brasil: práticas alternativas de manejo visando a conservação do solo e da água. Porto Alegre.
- Valeriano, M.M., 2008. Topodata: guia para utilização de dados geomorfológicos locais. São José dos Campos. Disponível em: <http://mtc-m16c.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m18@80/2008/07.11.19.24/doc/publicacao.pdf>. Acesso: 28 jan. 2020.
- Venzon, P.T., Pinheiro, A., Kaufmann, V., 2018. Hydrological simulation uncertainties in small basins through the SWAT model. Revista Brasileira de Recursos Hídricos [online] 23. Disponível: <https://doi.org/10.1590/2318-0331.231820180014>. Acesso 20 jun. 2022.
- Wrege, M.S., Reisser, C.J., Stinmetz, S., Radin, B., Fritsons., 2018. Risco de déficit hídrico para espécies florestais e frutíferas no Rio Grande do Sul. R. Ra'e Ga [online] 44. Disponível: <http://www.geog.ufpr.br/raega/archive.htm>. Acesso: 20 jun. 2022.
- Yira, Y., Diekkrüger, B., Steup, G.A., Bossa, Y., 2016. Modeling land use change impacts on water resources in a tropical West African catchment (Dano, Burkina Faso). Journal of Hydrology 537, 187-199.