

INTEGRAÇÃO DE FERRAMENTAS DE MODELAGEM AMBIENTAL, FRAGMENTAÇÃO DA PAISAGEM E TRATAMENTOS ESTATÍSTICOS NA AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DAS ÁGUAS

INTEGRATION OF ENVIRONMENTAL MODELING TOOLS, LANDSCAPE FRAGMENTATION AND STATISTICAL TREATMENTS IN THE EVALUATION OF WATER QUALITY

**Mariana Davila Fonseca
Paiva de Paula Freitas** 

Pesquisadora, Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial – Belo Horizonte (MG), Brasil.

Endereço para correspondência:

Mariana Davila Fonseca Paiva de Paula Freitas – Rua Anhanguera, 217 – Santa Tereza – CEP: 31015-090 – Belo Horizonte (MG), Brasil – E-mail: marianadfreitas@gmail.com

Recebido em: 17/12/2019

Aceito em: 06/07/2020

RESUMO

A modelagem ambiental é um processo computacional de amplas aplicações, incluindo projeção de cenários por meio dos autômatos celulares, em que células interagem por meio de condições predefinidas, possibilitando a previsão de futuros cenários. Dessa forma é possível avaliar, por exemplo, a evolução de atividades antrópicas em bacias hidrográficas com o uso de base cartográfica e imagens de satélite. Essa projeção é importante para a qualidade das águas, visto que os recursos hídricos são amplamente prejudicados por atividades humanas. Desse modo, o presente estudo tem como objetivo simular cenários para 15 anos em uma área localizada na bacia hidrográfica do ribeirão Vermelho, que abrange os municípios de Sabará, Santa Luzia e Taquaraçu de Minas, situados na Região Metropolitana de Belo Horizonte (MG), integrando-os com a fragmentação da paisagem e dados de qualidade das águas. As diferentes informações levantadas foram associadas para se inferir sobre o estado atual das águas e prever, conforme cenários futuros, tomadas de decisões para melhoria da sua qualidade. Inicialmente, foram mapeados em classes o uso e a ocupação do solo da bacia hidrográfica de três anos (1996, 2006 e 2016). As classes foram divididas em áreas naturais e antrópicas e associadas aos arquivos de drenagem, malha viária e altitude, sendo os *inputs* para o modelo de projeções de paisagem. A projeção indicou que, entre 1996 e 2016, os remanescentes de vegetação arbórea na bacia hidrográfica reduziram-se de 70 para 55%, e os resultados de análise de água mostraram que o ribeirão não atende aos valores de enquadramento conforme deliberação normativa (DN) 20/1997. Os cenários projetados pelo modelo de paisagem demonstraram o avanço das áreas antropizadas sobre as naturais, as quais em 2032 poderão se sobressair, cobrindo cerca de 60% da bacia hidrográfica. Além disso, essas projeções associadas aos parâmetros físico-químicos indicam tendência à diminuição da qualidade das águas, sendo necessárias tomadas de decisões para a melhora dessa projeção, visando atender ao enquadramento em classe I do curso de água.

Palavras-chave: autômatos celulares; gestão de recursos hídricos; previsão de cenários.

ABSTRACT

Environmental modeling is a computational process of wide applications, including projection of scenarios through cellular automata, in which cells interact by means of predefined conditions allowing the prediction of future scenarios. In this way, it is possible to evaluate, for example, the evolution of human activities in hydrographic basins using cartographic bases and satellite images. This projection is important for water quality as water resources are severely affected by human activities. Thus, the present study

aims to simulate scenarios for 15 years in an area located in the hydrographic basin of Ribeirão Vermelho, in the municipalities of Sabará, Santa Luzia, and Taquaraçu de Minas, located in the Metropolitan Region of Belo Horizonte, Minas Gerais, integrated with the fragmentation of the landscape and water quality data. The different information collected was associated to infer about the current state of the waters and to predict, according to future scenarios, decision-making to improve water quality. Initially, the use and occupation of land in the three-year hydrographic basin (1996, 2006, and 2016) was mapped into classes. The classes were divided into natural and man-made areas and, associated with the drainage files, road network and altitude, being the inputs for the model of landscape projections. The projection indicated that between 1996 and 2016 the remnants of tree vegetation in the hydrographic basin decreased from 70 to 55% and the results of water analysis showed that the stream does not meet the framing values according to DN 20/1997. The scenarios projected by the landscape model demonstrated the advance of anthropized areas over natural ones, which in 2032 may stand out, covering about 60% of the hydrographic basin. In addition, these projections associated with physical-chemical parameters indicate a tendency to decrease water quality, making decisions necessary to improve this projection, aiming to meet the class I classification of the watercourse.

Keywords: cellular automata; management of water resources; scenario prediction.

INTRODUÇÃO

A modelagem é uma ferramenta computacional de ampla aplicação para estudos ambientais. Consiste no uso de ferramentas matemáticas que, por meio de modelos, são capazes de projeção de cenários de aspectos socioambientais e prognósticos, de modo a nortear ações de controle da preservação do meio ambiente e de tomada de decisões (BRASIL, 2019). Paiva *et al.* (2020) utilizaram modelos para avaliar os impactos da expansão urbana na segurança da quantidade água em uma bacia localizada em São Paulo, combinando a expansão urbana e as projeções de aumento da população regional. Conforme o trabalho, o estudo contribui para discussões sobre segurança hídrica, abordando a importância da integração entre a água e o planejamento urbano.

Com vistas a avaliar a qualidade das águas, Mateus *et al.* (2015) utilizaram a modelagem para analisar o perfil do parâmetro de oxigênio dissolvido para identificar as principais fontes poluidoras e sugerir ações de controle no rio Uberaba (MG). Como resultado, o modelo permitiu mostrar que o curso de água estudado tem chances baixas de atender ao padrão ambiental, porém esse parâmetro poderia ser melhorado com o tratamento de carga orgânica lançada no rio.

Ohnuma Jr. e Mendiondo (2014) analisaram cenários ambientais para a proposição de medidas de recuperação de bacias para o Plano Diretor do Município de São Carlos (SP). Foi feito o mapeamento do uso e da ocupa-

ção do solo pretéritos e projeções de cenários futuros para subsidiar o planejamento ambiental.

Um dos métodos para a construção de cenários preditivos se dá por meio de autômatos celulares (AC), que permitem um ambiente de modelagem flexível, operadores espaciais e calibração e validação do método (BRASIL, 2019).

Os modelos de mudanças no uso da terra podem apoiar a compreensão dos processos e padrões de crescimento urbano que emergem das interações homem-ambiente. Os AC são uma abordagem comum para a modelagem de mudanças no uso da terra urbana, que permite descobrir e analisar possíveis vias de crescimento urbano por meio da construção de cenários, baseado em configuração de vizinhança, regras de transição e representação de entidades geográficas. Modelos e métodos que expandem o conhecimento e a experiência de órgãos tomadores de decisão sobre desenvolvimento urbano são de grande importância no apoio a medidas de desenvolvimento sustentável (YANG *et al.*, 2020). Para aplicar essa metodologia, foi estudada a área de estudo que compreende a bacia hidrográfica do ribeirão Vermelho, com área de 163,66 km², pertencente à bacia do rio das Velhas (Unidade de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos – UPGRH SF5), abrangendo os municípios de Sabará, Santa Luzia e Taquaraçu de Minas, situados na Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH) (Figura 1). O curso de água perfaz 28 km desde a sua nascente, na Serra da Piedade, até a sua foz, na margem direita do

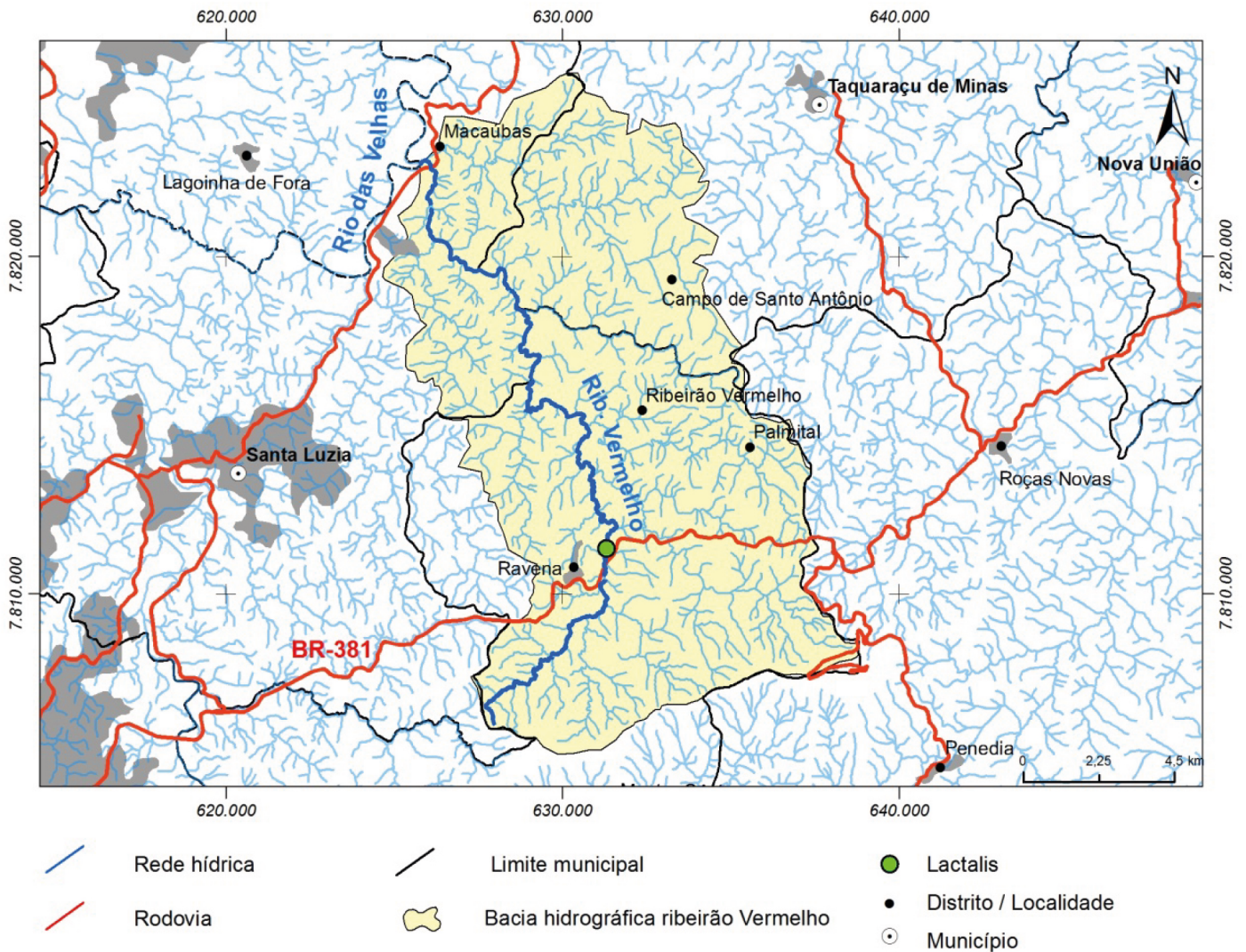


Figura 1 – Localização da área de estudo.

rio das Velhas. O ribeirão é enquadrado como classe 1 das nascentes à confluência com o rio das Velhas, conforme a DN do Conselho Estadual de Política Ambiental (COPAM) nº 20/1997, que dispõe sobre o enquadramento das águas, no entanto, um ponto monitorado no seu alto curso é categorizado como classe 3, no período chuvoso, e classe 4, na estiagem.

O Plano Diretor da área estudada propõe o estabelecimento de agendas que envolvam atividades econômicas, disponibilidade hídrica, necessidade de preservação de áreas de recarga, processos de uso e ocupação do solo. Nesse sentido, o presente trabalho tem como objetivo utilizar o método de modelagem ambiental,

simulando cenários para 15 anos integrados com a fragmentação da paisagem e dados de qualidade das águas. Dessa forma, fornecerá bases, subsídios técnicos e alertas para o estabelecimento de metas e ações que possam nortear a melhoria da qualidade das águas.

A qualidade das águas é uma preocupação cada vez mais recorrente por causa do aumento de demanda, da poluição e da diminuição de áreas naturais. As ações humanas têm forte influência sobre a qualidade e a quantidade das águas e, assim, o trabalho propõe uma avaliação temporal do uso do solo e cobertura da terra, bem como a projeção de cenários de paisagens antrópicas e naturais futuras por meio de modelagem ambiental.

MATERIAIS E MÉTODOS

Mapeamento temporal de uso do solo e cobertura da terra

A primeira etapa do trabalho foi o mapeamento temporal do uso do solo e da cobertura da terra da bacia hidrográfica do ribeirão Vermelho, que é uma das bases de entrada (*input*) para o desenvolvimento da modelagem ambiental.

Inicialmente, foi adquirida imagem de satélite de alta resolução para a elaboração do mapeamento das condições atuais e foram obtidas imagens do satélite Landsat 5, sensor Thematic Mapper (TM), com datas de 23 de junho de 1996 e 21 de julho de 2006, para o mapeamento das condições históricas de uso e ocupação do solo. Na sequência, delimitou-se a bacia hidrográfica com base na restituição de feições geográficas como a rede de drenagem, lagoas, estradas e curvas de nível com equidistância de 50 m das cartas topográficas Lagoa Santa, Jaboticatubas, Caeté e Belo Horizonte, na escala 1:50.000, elaboradas pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). As imagens foram georreferen-

ciadas por satélite com base em pontos de referência coletados nas cartas topográficas (*datum* WGS-84), por meio do *software* ArcGIS 10.3, na versão educacional.

As classes de uso e ocupação do solo e cobertura vegetal que ocorrem na bacia hidrográfica foram digitalizadas em tela. Os polígonos com menos de 1.500 m² não foram mapeados.

Para a visita de campo, foi elaborada uma carta imagem na escala de 1:10.000. No campo, foi feita a conferência visual dos padrões de interpretação, registro fotográfico e validação do mapeamento. Esses padrões foram definidos com base nos elementos de interpretação (cor, forma, textura, estrutura e relação de contexto).

Após a checagem, definiram-se a legenda e a interpretação final da carta imagem, consolidando o banco de dados em Sistema de Informação Geográfica e a quantificação das classes de uso e vegetação.

Classificação do uso do solo e cobertura da terra

Após a interpretação da imagem de satélite e a digitalização em tela do uso do solo e da cobertura da terra, os polígonos foram classificados conforme o Quadro 1.

Diante da disponibilidade de imagens em alta resolução, em 2016 foi realizada uma classificação mais precisa (uso detalhado). As imagens disponíveis para os

Quadro 1 – Classes de uso do solo e cobertura da terra.

Uso simplificado (1996, 2006 e 2016)	Uso detalhado (2016)
Corpos de água	Corpos de água
Campo rupestre	Campo rupestre
Vegetação arbórea nativa	Cerrado
	Floresta estacional semidecidual
Área construída	Área industrial
	Área urbana com baixa ocupação
	Área urbana
Mineração	Mineração
Pastagem	Pastagem
Reflorestamento	Reflorestamento
Solo exposto	Solo exposto

anos de 1996 e 2006 não permitiram uma detecção tão minuciosa quanto a de 2016, sendo classificadas de forma sintetizada (uso simplificado). Para comparar a evolução temporal entre os anos analisados, o uso simplificado foi aplicado também ao ano de 2016.

A classe de corpos de água engloba os recursos hídricos passíveis de serem mapeados, ou seja, que tenham forma de polígono e não linear, como represas e lagoas. O campo rupestre corresponde à fitofisionomia de vegetação típica de altitudes elevadas, rasteira e que cresce entremeadas às rochas. A vegetação arbórea nativa con-

siste em áreas de cerrado de porte arbóreo e floresta estacional semidecidual. A área construída engloba áreas industriais, áreas urbanas com baixa ocupação (pouca densidade de casas, como chácaras, sítios e ranchos, pequenas áreas cultivadas com criação de animais) e a área urbana (municípios, povoados e vilas). A mineração abarca as áreas de extração mineral. A pastagem compreende regiões com pastos em diversos estágios de conservação. O reflorestamento na bacia é representado por eucaliptos e o solo exposto pelas terras sem cobertura é decorrente de ações antrópicas.

Fragmentação da paisagem

Para quantificar a estrutura e a fragmentação da paisagem, o *software* livre FRAGSTATS 4.2 foi utilizado em razão das diversas opções de métricas disponíveis. Os padrões de paisagem encontrados na área de estudo são complexos, o que exigiu o uso de um conjunto de 10 métricas:

- CA: área total da classe mapeada;
- PLAND: porcentagem da classe na paisagem;
- NP: número de manchas da classe mapeada;
- LPI: porcentagem da paisagem composta da maior mancha;

- AREA_MN: tamanho médio das manchas;
- SHAPE_MN: forma média das manchas;
- PROX_MN: índice de proximidade;
- ENM_MN: distância euclidiana entre as manchas;
- IJI: índice de interspersão e justaposição;
- SHDI: índice de diversidade de Shannon.

A relação das métricas utilizadas é apresentada no Quadro 2.

Quadro 2 – Relação de métricas da paisagem.

Sigla (unidade)	Item
NP (#)	Number of Patches (número de manchas)
LPI (%)	Largest Patch Index (porcentagem da paisagem composta da maior mancha)
AREA_MN (ha)	Mean Patch Area (tamanho médio das manchas)
SHAPE_MN (ha)	Mean Shape Index (forma média das manchas)
PROX_MN (m)	Average Proximity Index (índice de proximidade)
ENM_MN (m)	Mean Euclidean Nearest Neighbor Distance (distância euclidiana entre as manchas)
IJI (%)	Interspersion/Juxtaposition Index (índice de interspersão e justaposição)
SHDI (#)	Shannon's Diversity Index (índice de diversidade de Shannon)
CA (ha)	Class area (área total da classe mapeada)
PLAND (%)	Percentage of Landscape (porcentagem da classe na paisagem)

Modelagem de cenários da paisagem

Os modelos de simulação de cenários da paisagem foram elaborados no *software* Dinamica EGO 4, desenvolvido pelo Centro de Sensoriamento Remoto da Universidade Federal de Minas Gerais (SOARES-FILHO; RODRIGUES; COSTA, 2009). O programa utiliza o sistema de AC, que consiste em “um conjunto de células com determinados valores, que interagem entre si em função de uma coleção finita de condições

predefinidas” (MELOTTI, 2009, p. 9). Os cenários gerados criam um modelo espaço-temporal de transições entre as classes definidas nos mapas de entrada. As etapas da modelagem estão indicadas no fluxograma da Figura 2 e serão detalhadas neste tópico. As classes de uso do solo e cobertura da terra foram agrupadas em áreas naturais e áreas antropizadas, conforme Quadro 3.

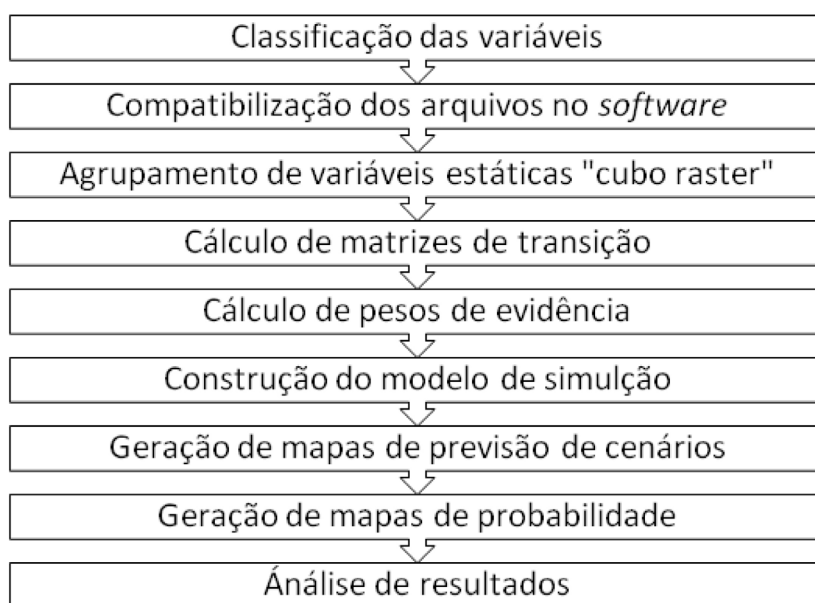


Figura 2 – Fluxograma de etapas da construção do modelo de simulação de cenários de mudança na paisagem.

Quadro 3 – Classes de uso do solo e cobertura da terra por categoria de paisagem.

Classe de uso do solo e cobertura da terra	Paisagem
Corpos de água	Natural
Campo rupestre	Natural
Vegetação arbórea nativa	Natural
Área construída	Antropizada
Mineração	Antropizada
Pastagem	Antropizada
Reflorestamento	Antropizada
Solo exposto	Antropizada

O *software* apresenta os requisitos para gerar o modelo, sendo necessário ajustar os arquivos de entrada (*inputs*) para formato compatível (*raster* — imagem) e padronizar o número de linhas e colunas. Os *inputs* são divididos em variáveis estáticas, ou seja, que não têm alteração significativa ao longo do tempo (malha viária, drenagem e altitude) e as dinâmicas são representadas pelos mapas de uso do solo e cobertura da terra agrupados em paisagens naturais e antropizadas. A paisagem inicial foi o mapa de 1996 e a final o mapa de 2016. Os *inputs* são apresentados no Quadro 4. As etapas de classificação e padronização dos arquivos foram realizadas no *software* ArcGIS 10.3.

As variáveis estáticas malha viária, drenagem e altitude foram reunidas em um arquivo único denominado de cubo *raster*. Essas variáveis estáticas podem ter influência no comportamento da paisagem ao longo do tempo, como por exemplo a preferência de expansão de áreas antrópicas próximas à malha viária. Em seguida, foi calculada a matriz de transição, que resulta na taxa de mudança das áreas naturais (2) para as antrópicas (1), incorporando as paisagens inicial (1996) e final

(2016) e o período de análise (20 anos) (SOARES-FILHO; RODRIGUES; COSTA, 2009). Posteriormente, calcularam-se os pesos de evidências com o suporte das variáveis estáticas e das paisagens inicial e final. Como resultado desse passo, têm-se os pesos que indicam as áreas mais e menos favoráveis para alterações.

O último passo foi a construção do modelo de previsão de cenários e probabilidades apresentado na Figura 3. Cada caixa é denominada de *functor* e tem a função de executar uma determinada operação concatenada aos demais constituintes do modelo. Diante do escopo da proposta, o modelo foi preparado para cenários entre 2017 e 2032. Os arquivos de entrada foram o cubo *raster* (“cubo.tif”), os pesos de evidência (“weight_report.csv”), o mapeamento da paisagem de 2016 (“usosolo2016.tif”) e a matriz de transição (“multiple_steps_2_1.csv”).

Os *functores* inseridos na caixa Repeat executam funções de atualização dinâmica do mapa inicial, cálculo de probabilidade de mudanças entre as classes e reprodução de padrões de mudanças. O *functor* Repeat recebe o número de iterações (repetições) com o número 16,

Quadro 4 – Inputs do modelo de mudança da paisagem.

Variável	Classificação	Fonte
Paisagem em 1996	1: área antrópica	Imagens de satélite: Landsat (1996)
	2: área natural	
Paisagem em 2006	1: área antrópica	Imagens de satélite: Landsat (2006)
	2: área natural	
Paisagem em 2016	1: área antrópica	Imagem de satélite: Landsat (2016)
	2: área natural	
Drenagem	Presença ou ausência	IBGE, 2012
Malha viária	Presença ou ausência	Open Street Map (2017) e IBGE, 2012
Altitude	1: 660 a 770 m	SRTM
	2: 771 a 867 m	
	3: 868 a 990 m	
	4: 991 a 1156 m	
	5: > 1.156 m	

IBGE: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística; SRTM: Shuttle Radar Topography Mission.

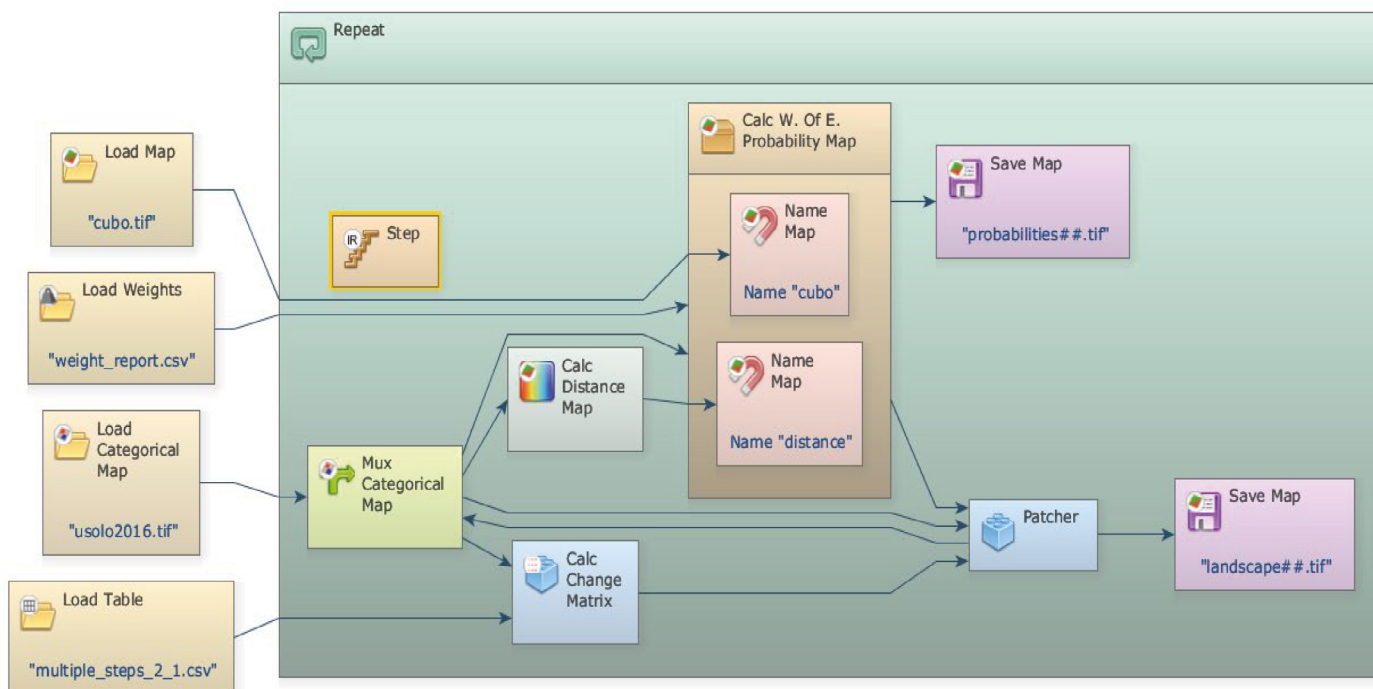


Figura 3 – Fluxograma do modelo de alteração da paisagem.

uma vez que se propôs a modelagem para os próximos 15 anos a partir do ano atual (2017). Como produto, o modelo gerou mapas finais da projeção (*landscape*)

Qualidade das águas

Para correlacionar a qualidade das águas com o percentual de antropização, foram avaliados os parâmetros de demanda bioquímica de oxigênio (DBO), nitrogênio total e fósforo total, de uma série histórica entre os anos de 2013 e 2016 das águas superficiais de um ponto no ribeirão Vermelho. Esses parâmetros são representativos na avaliação de lançamento de efluen-

tes domésticos nas águas. Os dados foram tabulados e ordenados, *outliers* foram excluídos e foi calculada a média anual para o período avaliado. O valor obtido foi associado ao grau de antropização da bacia do ribeirão Vermelho até o ponto amostrado, de modo a avaliar a correlação entre eles e prever o valor esperado com a potencial degradação da área de estudo.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Mapeamento do uso do solo e cobertura da terra

Os resultados do mapeamento temporal do uso do solo e cobertura da terra nos anos de 1996, 2006 e 2016 estão apresentados na Tabela 1.

No período analisado, as áreas ocupadas por corpos de água e campo rupestre variaram menos de 1%, enquanto os remanescentes de vegetação arbórea

se reduziram de 70% em 1996 para 55% em 2016. As perdas de vegetação mais significativas ocorreram nos cursos médio e baixo do ribeirão. Os fragmentos florestais situados no alto curso, nas imediações da Serra da Piedade, não sofreram alterações significativas em função da falta de acessos e da declividade elevada.

Tabela 1 – Resultado quantitativo do mapeamento temporal de uso do solo e cobertura da terra em 1996, 2006 e 2016.

Classe	Área (ha)			Área (%)		
	1996	2006	2016	1996	2006	2016
Corpos de água	18	31	24	0,11	0,19	0,15
Campo rupestre	288	247	246	1,76	1,51	1,5
Vegetação arbórea nativa	11.436	9.588	9.071	69,54	58,58	55,43
Área construída	405	1.085	1.766	2,81	6,63	10,79
Mineração	38	88	102	0,23	0,54	0,62
Pastagem	4.031	5.013	4.606	24,63	30,63	28,14
Reflorestamento	52	14	77	0,32	0,09	0,47
Solo exposto	98	299	475	0,6	1,83	2,3
Total	16.366	16.366	16.366	100	100	100

A classe de área construída, composta de cidades, povoados e vilas, urbanização de baixa densidade e área industrial, aumentou significativamente, representando 11% da ocupação na bacia hidrográfica. A mineração e o reflorestamento mantiveram-se com baixo percentual ao longo dos anos, representando menos de 1% da cobertura do solo em 2016. As áreas de pastagem aumentaram entre 1996 e 2006 e diminuíram na última década, ocupando, até o último ano analisado, 30%. O solo exposto aumentou com o passar dos anos, representando 3% em 2016. De maneira geral, houve substituição de áreas naturais (vegetação arbórea nativa) por áreas antropizadas.

A Figura 4 ilustra o mapa de uso do solo e cobertura vegetal do ano de 2016. Apesar de haver evidências da substituição de áreas naturais por áreas antropizadas, mais da metade da área da bacia hidrográfica do ribeirão Vermelho ainda é coberta por paisagens naturais. Esses remanescentes geralmente se concentram em regiões elevadas e de solo menos profundo na porção sul da área de estudo, no caso das formações de campo rupestre, e ao longo da rede de drenagem, em se tratando da floresta estacional semidecidual. As pastagens geralmente encontram-se em bom estado de conservação, abrangem quase 30% da bacia, e distribuem-se em toda a área de estudo, especialmente no médio-baixo curso do ribeirão, onde se localizam as comunidades Palmital, Ribeirão Vermelho, Campo de Santo Antônio e Macaúbas. As áreas construídas ocorrem ao longo dos

principais cursos de água e da malha viária. Destaca-se o distrito de Ravena, pertencente ao município de Sabará (MG), que possui uma Estação de Tratamento de Água (ETA) destinada ao seu abastecimento. O distrito, as vilas, povoados, sítios e chácaras não dispõem de Estação de Tratamento de Efluentes (ETE). Nesses locais, os efluentes líquidos são destinados em fossas ou lançados diretamente na rede de drenagem.

A área de preservação permanente (APP) do ribeirão Vermelho, conforme a Lei nº 12.651 (BRASIL, 2012) é de 30 m (para cursos de água de menos de 10 m de largura). Para fins de representação gráfica, adotou-se uma faixa de 200 m (*buffer*) para ilustrar o entorno do ribeirão (Figura 5). Na APP são encontradas propriedades que se prolongam, na maioria dos casos, até as margens do curso de água. As áreas de pastagem na faixa de APP apresentam uso mais intenso, principalmente na estação seca, por permanecerem mais verdes e por se situarem em área de acesso à água pelos animais. Nos cursos médio e baixo há o plantio de culturas temporárias. A floresta estacional semidecidual compõe a maior área no entorno do curso de água, porém o somatório do percentual de áreas antrópicas (52%) sobressai ao de áreas naturais (48%). A Tabela 2 apresenta o quantitativo do mapeamento detalhado do *buffer* de 200 m do ribeirão Vermelho (2016).

A Figura 6 apresenta o registro fotográfico dos usos do solo e cobertura da terra observados na área de estudo.

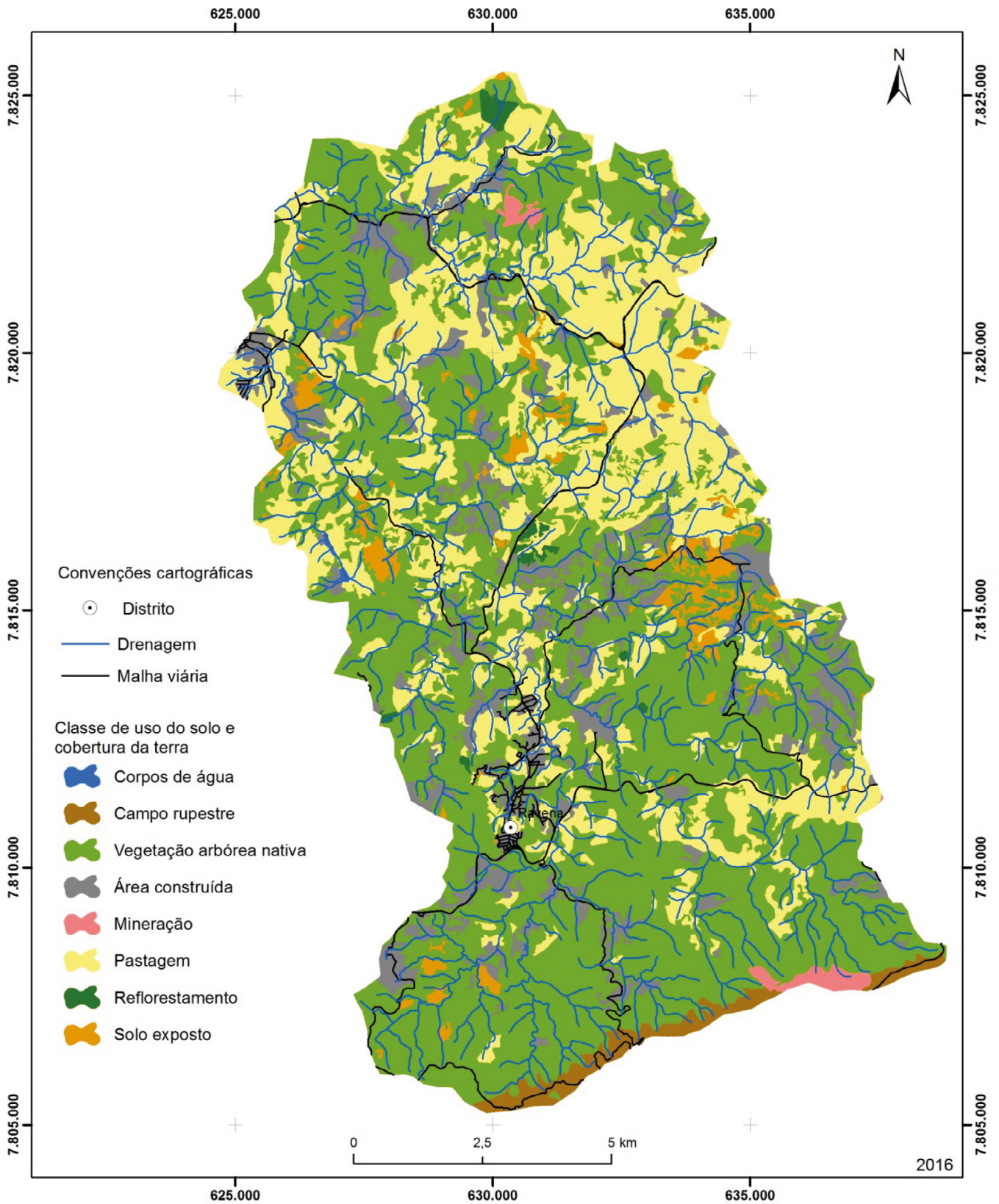


Figura 4 – Mapa de uso do solo e cobertura da terra de 2016.

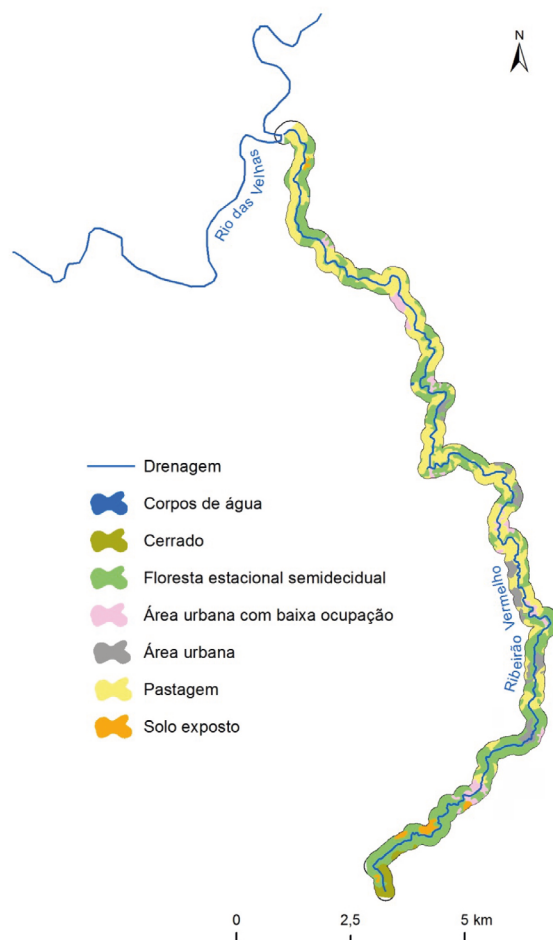


Figura 5 – Mapeamento detalhado de uso do solo e cobertura da terra na área de preservação permanente do ribeirão Vermelho (2016).

Tabela 2 – Resultado quantitativo do mapeamento detalhado de uso do solo e cobertura da terra no buffer de 200 m do ribeirão Vermelho (2016).

Classe	Área (ha)	Área (%)
Corpos de água	0,50	0,05
Cerrado	22,82	2,16
Floresta Estacional Semidecidual	481,60	45,56
Área urbana com baixa ocupação	53,02	5,02
Área urbana	56,04	5,30
Pastagem	426,25	40,32
Solo exposto	16,87	1,60
Total	1.057,10	100,00

Fragmentação da paisagem

Com base nos mapas de uso e cobertura da terra dos anos de 1996 e 2016, foram calculadas as métricas de classe e paisagem das categorias área construída e vegetação arbórea nativa, por apresentarem as maiores mudanças no período analisado. Os resultados são apresentados na Tabela 3.

Na área de estudo, as formações florestais representam a dominância porque ocupam a maior área na bacia hidrográfica, porém o índice de ocupação dessa classe (PLAND) durante o período se reduziu de 69,9 para 55,3%, enquanto o número de manchas (NP) aumentou de 73 para 140. Essa combinação de resulta-

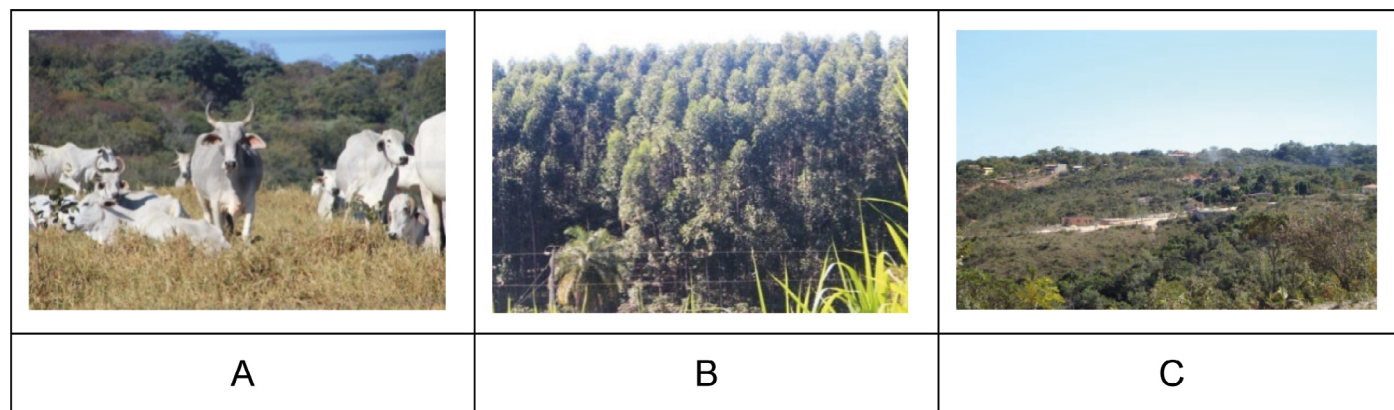


Figura 6 – Registro fotográfico do uso do solo e cobertura da terra: (A) pastagem; (B) reflorestamento de eucalipto; (C) área urbana de baixa ocupação.

Tabela 3 – Métricas de paisagem e resultados quantitativos.

Classe/ recorte*	CA (ha)	PLAND (%)	NP (#)	LPI (%)	AREA_MN (ha)	SHAPE_MN (#)	PROX_MN (m)	ENM_MN (m)	IJI (%)	SHDI
1996										
Área construída	412,3	2,5	49,0	0,3	8,4	1,6	2,7	576,8	30,6	--
Vegetação arbórea nativa	11.437,5	69,9	73,0	66,6	156,7	1,6	4.850,6	132,5	35,6	--
Geral	--	--	292,0	66,6	56,0	1,7	1.309,4	501,4	27,8	0,8
2016										
Área construída	1.765,2	10,8	165,0	0,7	10,7	1,7	15,0	223,0	36,3	--
Vegetação arbórea nativa	9.054,0	55,3	140,0	42,4	64,7	1,6	2.245,5	130,5	57,1	--
Geral	--	--	556,0	42,4	29,4	1,6	603,7	264,8	45,7	1,2

CA: área total da classe mapeada; PLAND: porcentagem da classe na paisagem; NP: número de manchas da classe mapeada; LPI: porcentagem da paisagem composta da maior mancha; AREA_MN: tamanho médio das manchas; SHAPE_MN: forma média das manchas; PROX_MN: índice de proximidade; ENM_MN: distância euclidiana entre as manchas; IJI: índice de interspersão e justaposição; SHDI: índice de diversidade de Shannon.

dos sugere a quebra de grandes núcleos florestais em menores parcelas. O índice de forma médio das manchas (SHAPE_MN) é superior a um, expondo o fato de que a forma média das áreas florestais é diferente de um quadrado, o que pode acentuar o processo de perda dos núcleos existentes em virtude do efeito de borda. Essa hipótese é corroborada pelo LPI, que diminuiu de 66,6 para 42,4%, e pela redução do índice de proximidade médio (PROX_MN, definido por 1.000 m de raio) de 4.850 para 2.245 m. O índice de interspersão e justaposição aumentou de 35,6 para 57,1, indicando que as áreas florestais se fragmentaram e estão menos contínuas, sobretudo nos cursos médio e baixo do ribeirão Vermelho.

A evolução da ocupação urbana implicou o aumento da fragmentação da paisagem por meio do incremento do número de manchas de 49 para 169 e pelo aumento do PLAND de 2,5 para 10,8% durante o período. O tamanho médio das manchas (AREA_MN) aumentou de 8,41 para 10,70 ha, enquanto a distância euclidiana média (ENN_MN) entre elas passou de 223 para 576,8 m. Esses resultados sugerem que houve adensamento da ocupação urbana com o surgimento de novos núcleos habitacionais e com a expansão das áreas em torno dos núcleos já existentes. Essa classe

Modelo de cenários da paisagem

O modelo de uso do solo e cobertura da terra foi projetado para cenários de até 15 anos, contemplando áreas naturais e antropizadas. Os cenários projetados demonstraram o avanço das áreas antropizadas sobre as naturais, podendo sobressair na paisagem em 2032 e cobrir 58% da bacia hidrográfica (Figura 7). Os resultados dessa projeção acompanham a tendência de urbanização observada no mapeamento temporal realizado entre 1996 e 2016, caso não haja mudanças no padrão de ocupação da bacia em função de questões sociais, ambientais ou políticas.

As áreas antrópicas (cinza) terão sua expansão condicionada à existência de estruturas já consolidadas nas proximidades da malha viária. O cenário construído corrobora o panorama de ocupação atual observado em visita de campo, uma vez que há por todo o território avaliados sinais de expansão urbana. O relevo tem expressiva influência na dinâmica da ocupação espacial, atuando como barreira à expansão urbana em regiões mais elevadas e declivosas situadas na

de ocupação deixou de representar pequenos fragmentos para se tornar um elemento dominante da configuração da paisagem.

A análise de paisagem evidenciou a fragmentação da área de estudo, com o incremento do número total de manchas de 292 para 556, enquanto a área média de cada mancha baixou de 56 para 29,4 ha. Adicionalmente, o índice de diversidade de Shannon (SHDI) foi maior em 2016 do que em 1996, evidenciando o aumento da heterogeneidade da paisagem. A diminuição da distância euclidiana média de 501,3 para 264,8 m revela que as manchas estão menos isoladas.

Sob um ponto de vista conservacionista, a perda de qualidade dos índices supracitados nos níveis de classe e paisagem reflete o aumento da pressão antropogênica decorrente do desenvolvimento da ocupação humana na bacia hidrográfica do ribeirão Vermelho. A tendência à substituição de áreas naturais por áreas antropizadas é evidenciada pela fragmentação dos remanescentes florestais, bem como pela expansão de áreas urbanas em regiões rurais e em torno dos núcleos já existentes. Essa condição influencia negativamente os recursos bióticos e, conseqüentemente, altera a qualidade das águas.

porção sul (Figura 8). Essas áreas provavelmente continuarão preservadas, mantendo a vegetação natural ao longo do tempo. Ressalta-se que o estudo apresentado nesse item se refere a um modelo no qual se contemplaram os descritores altitude, malha viária, drenagem e transição entre as paisagens de 1996 até 2016. A inclusão de outras variáveis pode implicar cenários diferentes.

Além dos mapas da paisagem, o modelo elaborado permitiu gerar mapas de probabilidades da expansão das áreas antropizadas, conforme Figura 9. As cores em tons de verde têm baixa probabilidade de substituição de áreas naturais por usos antrópicos, as em tom amarelo têm probabilidade intermediária e as de tons vermelhos, alta probabilidade. As manchas em cinza são as áreas já alteradas.

Observa-se que a maior tendência de expansão ocorre nas imediações de estradas e rodovias e no entorno de manchas urbanas já existentes. A porção mais

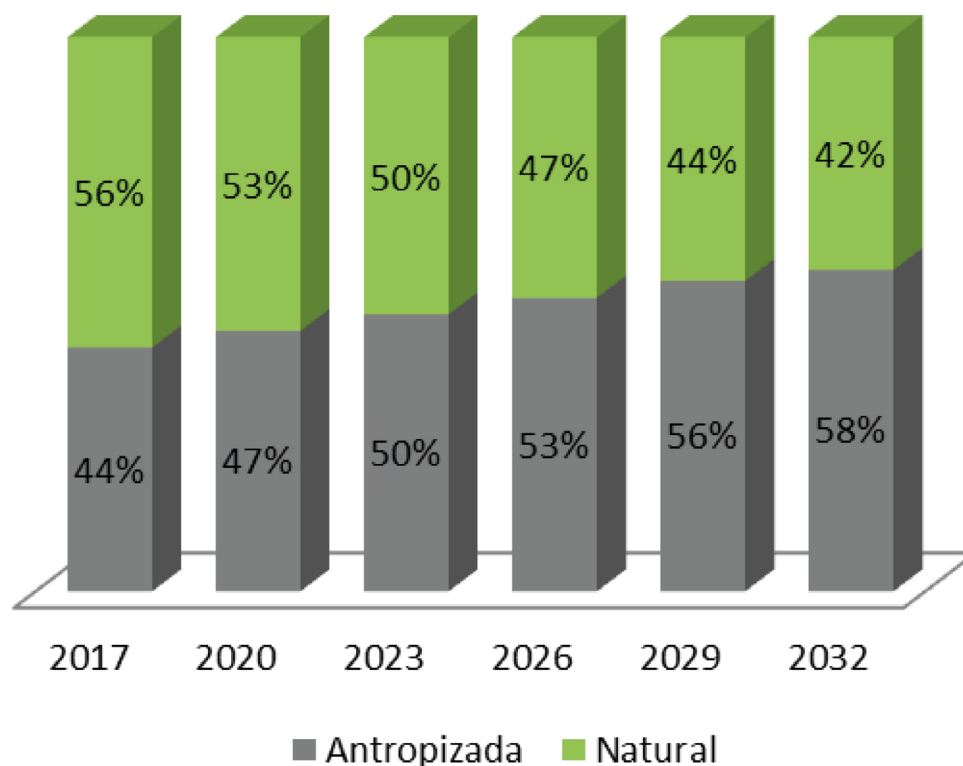


Figura 7 – Áreas naturais e antropizadas (%) do modelo de cenários da paisagem.

elevada da bacia hidrográfica, que conta com áreas de campo rupestre, floresta estacional semidecidual e

Qualidade das águas

Os dados de qualidade das águas indicaram que o ribeirão não atende à classificação prevista para seu enquadramento, que deveria atender à classe I, conforme Tabela 4.

Correlacionando esses dados com o percentual de antropização da bacia de contribuição do ponto amostrado, a DBO teve 11% de correlação, o fósforo 54%

Recomendações

Conforme resultados do trabalho, recomenda-se: apresentar aos órgãos competentes propostas de discussão de metas progressivas intermediárias da qualidade da água e programa com ações para se alcançar a meta final para a classe 1, considerando-se os cenários de curto, médio e longo prazos. Uma dessas medidas pode ser, por exemplo, o tratamento de esgoto doméstico. Além disso,

cerrado, tem baixa probabilidade de modificação até o ano de 2032.

e o nitrogênio 96%. Foi feita a integração dos dados de projeção de cenários de grau de antropização e a projeção dos dados de qualidade das águas conforme esses percentuais. Os resultados indicaram que, para os três parâmetros avaliados, a previsão é de que os valores continuem acima dos limites estabelecidos para a classe I.

sugere-se apresentar o estudo de projeções como base para a discussão de proposições de serviços ambientais, para motivar a implantação de medidas de conservação dos remanescentes naturais. Isso porque os cenários futuros indicam que as áreas antrópicas sobressairão na bacia hidrográfica nos próximos 15 anos, podendo comprometer ainda mais a qualidade de água para o ribeirão.

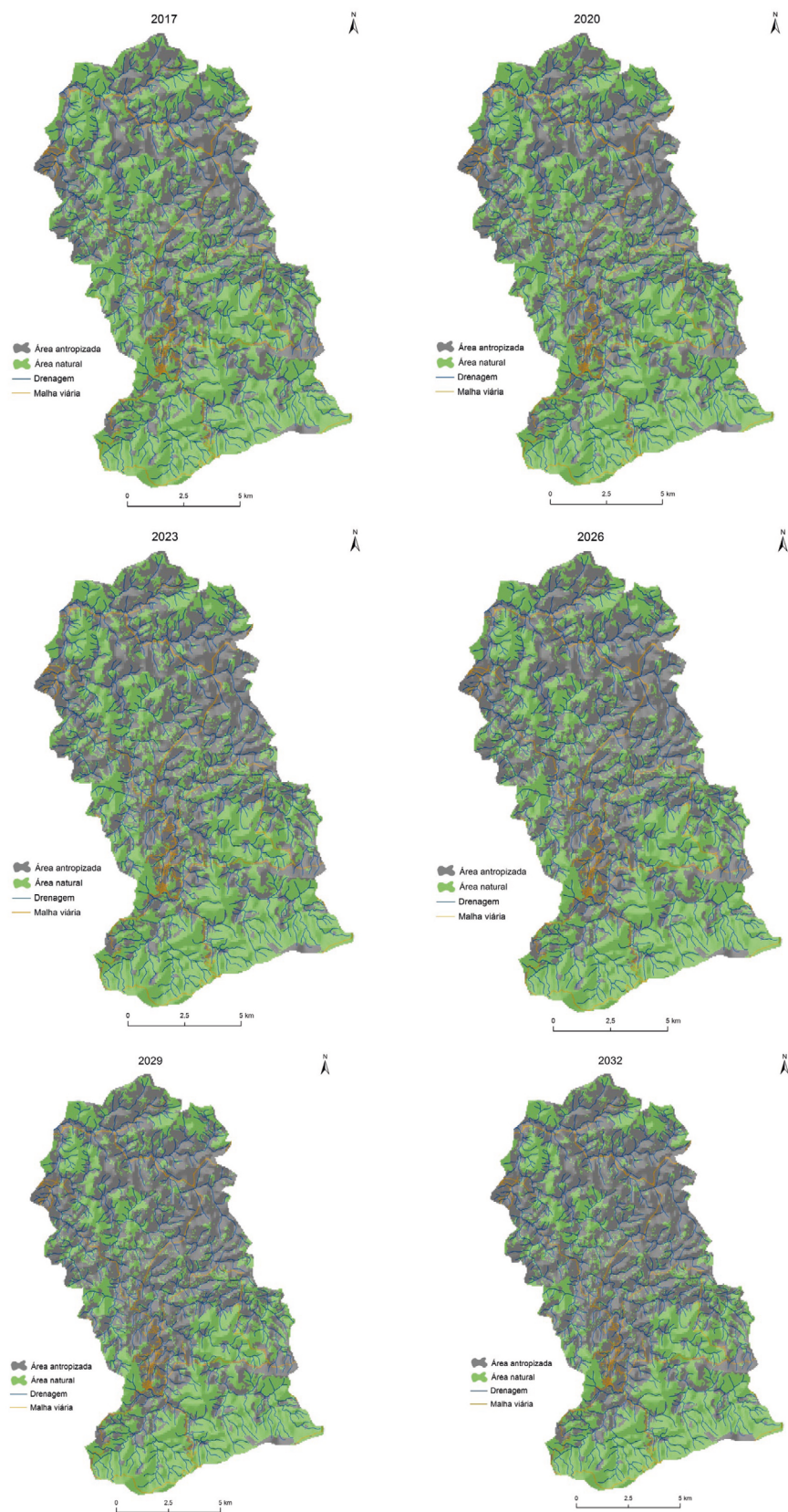


Figura 8 – Mapas gerados pelo modelo de previsão: exemplos entre 2017 e 2032.

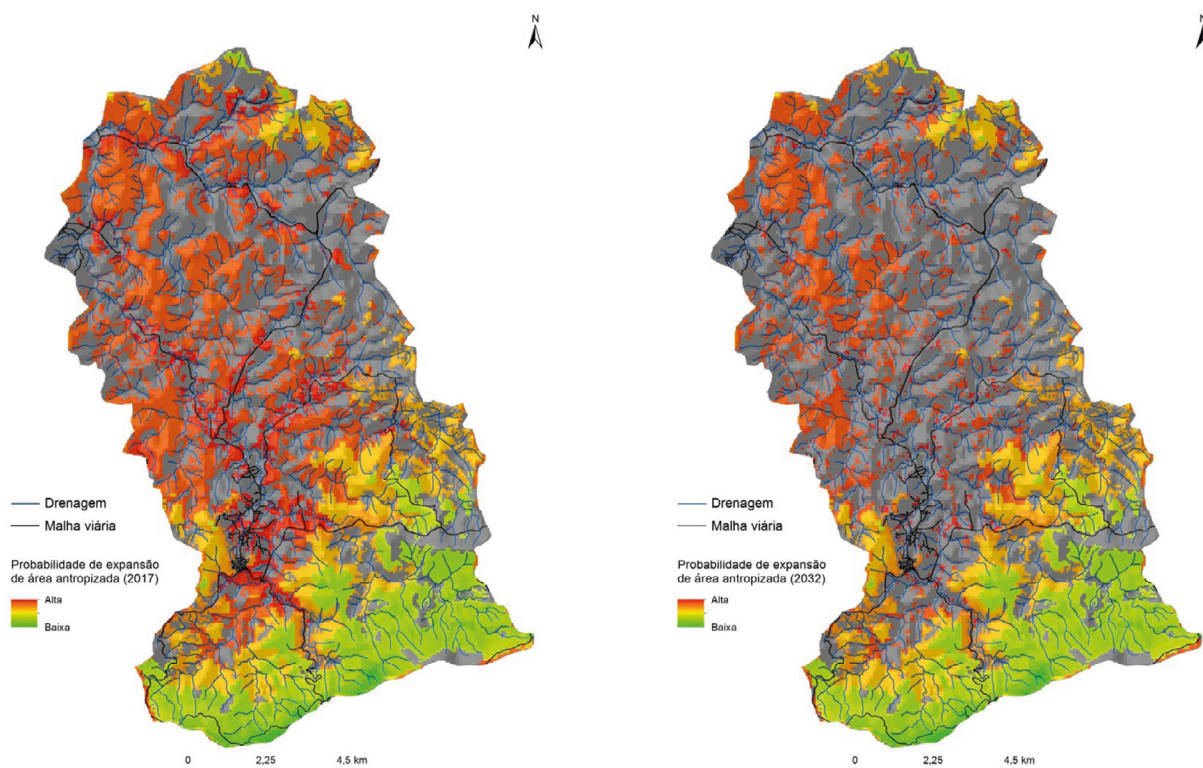


Figura 9 – Probabilidade de expansão de áreas antropizadas em (A) 2017 e (B) 2032.

Tabela 4 – Resultados de parâmetros de qualidade das águas.

Parâmetro	Média (mg L ⁻¹) / ano				Limite classe 1 (DN nº 01/2008)
	2013	2014	2015	2016	
DBO	2,57	7,78	10,5	5,13	3
Fósforo	2,1	3,3	4,29	3,54	0,02
Nitrogênio	0,19	0,35	0,37	0,56	-

DN: Deliberação Normativa; DBO: demanda bioquímica de oxigênio.

CONCLUSÕES

Entre 1996 e 2016, os remanescentes de vegetação arbórea na bacia hidrográfica reduziram-se de 70 para 55%, com perdas mais significativas nos cursos médio e baixo do ribeirão. A maior parte dessa área foi substituída por núcleos habitacionais. A floresta estacional semidecidual compõe a maior área no entorno do ribeirão, porém predominam áreas antrópicas (52%) sobre as áreas naturais (48%).

Os cenários projetados pelo modelo de uso do solo e cobertura da terra demonstraram o avanço das áreas antropizadas sobre as naturais, podendo as primeiras sobressair em 2032 na paisagem e cobrir cerca de 60% da bacia hidrográfica. Associando esse modelo à previsão de cenários para os parâmetros DBO, fósforo e nitrogênio, o ribeirão Vermelho não atenderá aos limites previstos para cursos de água classe I.

A metodologia utilizada, baseada em AC, gerou resultados que indicam a necessidade de medidas para melhoria da qualidade das águas, uma vez que as projeções futuras mostram aumento de áreas antrópicas que poderão acarretar degradação ainda maior de qualidade das águas. As mudanças de cenário se mostram coerentes, visto que há tendência à expansão de paisagem alteradas nas imediações de estradas e rodovias e no entorno de manchas urbanas já existentes, intensificando e concentrando ainda mais as atividades humanas. A porção mais eleva-

da da bacia hidrográfica, que conta com áreas de campo rupestre, floresta estacional semidecidual e cerrado, tem baixa probabilidade de modificação até o ano de 2032. Esta tendência é coesa, já que geralmente as áreas de cabeceira das bacias têm maiores dificuldades de acesso em razão da topografia acentuada. Esta pesquisa espera apoiar uma abordagem interdisciplinar para as equipes de órgãos tomadores de decisões, tornando as questões da água e de planejamento urbano mais próximas e essenciais para o desenvolvimento sustentável.

REFERÊNCIAS

BRASIL. *Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012*. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa. Brasil, 2012. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/l12651.htm>. Acesso em: 18 dez. 2019.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. *Modelagem de sistemas ambientais: dinâmica EGO*. Disponível em: <https://www.mma.gov.br/estruturas/sbf_chm_rbbio/_arquivos/02_flavio_oliveira___dinamica_ego.pdf>. Acesso em: 18 dez. 2019.

CONSELHO ESTADUAL DE POLÍTICA AMBIENTAL (COPAM). *Deliberação normativa nº 20, de 24 de junho de 1997*. Dispõe sobre o enquadramento das águas da bacia do rio das Velhas. COPAM, 1997. Disponível em: <<http://pnqa.ana.gov.br/Publicacao/Minas%20Gerais%20-%20Rio%20das%20Velhas%20-%20Bacia%20do%20S%C3%A3o%20Francisco.pdf>>. Acesso em: 18 jun. 2020.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). *Mapeamento Sistemático do Brasil*. Brasil: IBGE, 2012. Disponível em: <<http://portaldemapas.ibge.gov.br/portal.php#homepage>>. Acesso em: 2 ago. 2017.

LANDSAT. *Imagens de satélite. Catálogo de imagens INPE*. 1996. Disponível em <<http://www.dgi.inpe.br/CDSR/>>. Acesso em: 2 ago. 2017.

LANDSAT. *Imagens de satélite. Catálogo de imagens INPE*. 2006. Disponível em <<http://www.dgi.inpe.br/CDSR/>>. Acesso em: 2 ago. 2017.

LANDSAT. *Imagens de satélite. Catálogo de imagens INPE*. 2016. Disponível em <<http://www.dgi.inpe.br/CDSR/>>. Acesso em: 2 ago. 2017.

MATEUS, M.; GONÇALVES, J.; LOPES JUNIOR, G.; OKURA, M. Análise de incerteza e modelagem de qualidade da água do rio Uberaba, Minas Gerais. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais*, n. 37, p. 1-15, 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.5327/Z2176-947820159914>>. Acesso em: 18 jun. 2020.

MELOTTI, G. *Aplicação de autômatos celulares em sistemas complexos: um estudo de caso em espalhamento de epidemias*. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

OHNUMA JR., A.; MENDIONDO, E. Análise de cenários com proposição de medidas de recuperação ambiental para a micro-bacia do Tijuco Preto, São Carlos-SP. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais*, n. 32, p. 42-51, 30 jun. 2014. Disponível em: <http://rbciamb.com.br/index.php/Publicacoes_RBCIAMB/article/view/247/202>. Acesso em: 19 jun. 2020.

OPEN STREET MAP. *Mapas do Mundo*. Disponível em: <<https://www.openstreetmap.org/>>. Acesso em: 2 ago. 2017.

PAIVA, A.C.E.; NASCIMENTO, N.; RODRIGUEZ, D.A.; TOMASELLA, J.; CARRIELLO, F.; REZENDE, F.S. Urban expansion and its impact on water security: The case of the Paraíba do Sul River Basin, São Paulo, Brazil. *Science of the Total Environment*, v. 720, 137509, 2020. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969720310202>>. Acesso em: 20 jun. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137509>

SOARES-FILHO, B.S.; RODRIGUES, H.O.; COSTA, W.L. *Modelagem de Dinâmica Ambiental com Dinâmica EGO*. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2009.

YANG, J.; GONG, J.; TANG, W.; LIU, C. Patch-based cellular automata model of urban growth simulation: Integrating feedback between quantitative composition and spatial configuration. *Computers, Environment and Urban Systems*, v. 79, 101402, 2020. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0198971519300511?via%3Dihub>>. Acesso em: 20 jun. 2020.

